

## Trabajo Fin de Grado

Estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire.  
Implementación de un software de prediseño.

State of the art of Earth-to-air heat exchangers.  
Implementation of a pre-design software.

Autor

Isabel Edo Escudero

Tutor

Belén Zalba Nonay

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

2021



## Resumen

El presente trabajo de fin de grado consta de dos partes diferenciadas. La primera se ha basado en la recopilación y análisis de información de los intercambiadores de calor tierra-aire.

El primer capítulo desarrolla la identificación de la problemática relativa a los altos consumos energéticos derivados de la climatización en los edificios, así como el incremento en la necesidad de ventilación derivada de la pandemia de COVID -19. Además, se ha estudiado la normativa, tanto europea como nacional, relativa a los intercambiadores de calor tierra-aire.

El segundo capítulo del trabajo desarrolla el estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire, el cual ha sido dividido en dos partes, la recopilación y análisis de los datos de la bibliografía y, posteriormente, el estudio de los mecanismos de transferencia de calor mediante un análisis de las resistencias térmicas del sistema. En la primera parte, se han consultado 105 fuentes bibliográficas, de las cuales se han obtenido datos para el análisis de 32 instalaciones. Posteriormente, se han calculado y analizado las diferentes resistencias térmicas de éstas. Los objetivos alcanzados en este apartado han sido conocer el estado de esta tecnología, tanto a nivel nacional como internacional, estudiar los mecanismos de transferencia de calor, en especial el orden de magnitud de las resistencias térmicas que forman el sistema y la influencia de los distintos parámetros de la instalación en ellas, y, por último, adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de una herramienta de prediseño.

La segunda parte del trabajo, correspondiente al tercer capítulo, consiste en el desarrollo de un software de prediseño de intercambiadores tierra-aire basado en los conocimientos adquiridos durante la elaboración del estado del arte. Además, con la recopilación de los datos de una instalación real (edificio CIEM, Zaragoza), se han validado los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo. Por último, se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se han estudiado las incertidumbres asociadas a los parámetros de entrada.

Por último, en el capítulo cuarto, se han expuesto las conclusiones derivadas de las distintas partes del trabajo, así como la propuesta de distintas líneas de futuro relacionadas con esta tecnología y su desarrollo en el edificio de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza.

## Agradecimientos

El presente trabajo de fin de grado no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda y colaboración de la Unidad Técnica de Construcción y Energía de la Universidad de Zaragoza, en especial a Carlos González, por su implicación en el desarrollo de este trabajo y la oportunidad de visitar la ejecución de la obra de los intercambiadores de calor tierra-aire del edificio de Filosofía y Letras. Espero que éste sea el primero de muchos trabajos en colaboración con la UTCE sobre el estudio de esta tecnología.

Agradecer a Belén su implicación y motivación, demostrando que no hay nada más contagioso que tener pasión por lo que haces.

A mis padres y hermana, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado.

A Lucía, por acompañarme en el camino desde el primer día.

# Índice

1.	Introducción, metodología y objetivos.....	14
2.	Contexto energético actual.....	17
2.1.	Objetivos de eficiencia energética en edificación .....	18
2.2.	Normativa vigente en España para el diseño de ICTA .....	19
3.	Estado del arte.....	21
3.1.	Origen y antecedentes.....	21
3.2.	Concepto de intercambiador de calor tierra-aire .....	22
3.3.	Principio de funcionamiento .....	23
3.3.1.	Condiciones del terreno.....	25
3.3.2.	Diseño y elementos de la instalación.....	30
3.3.3.	Mantenimiento y controles .....	37
3.3.4.	Otras consideraciones .....	37
4.	Software de prediseño .....	41
4.1.	Desarrollo de la hoja de cálculo .....	41
4.1.1.	Hoja principal.....	42
4.1.2.	Hojas de cálculos .....	43
4.1.3.	Hipótesis simplificadoras .....	43
4.2.	Validación del software.....	45
4.2.1.	Datos de entrada de la simulación .....	45
4.2.2.	Resultados de simulación .....	46
4.3.	Análisis de sensibilidad .....	51
4.3.1.	Análisis de incertidumbres.....	51
4.3.2.	Estudio del salto térmico obtenido en función de la temperatura de entrada del aire .....	58
4.3.3.	Conclusiones del análisis de sensibilidad.....	63
5.	Conclusiones .....	64
	Referencias .....	68
	Anexo 1: Resumen Directiva 2010/31/UE .....	76
	Anexo 2: Test de Respuesta Térmica, TRT.....	77
	Anexo 3: Edificio de la Facultad de Filosofía, Universidad de Zaragoza. ....	78
	Anexo 4: Prueba de medición de la conductividad térmica del terreno mediante conductivímetro.....	83
	Anexo 5: Recopilación de instalaciones y análisis de datos .....	84
	Anexo 6: Modelos matemáticos para el diseño de intercambiadores .....	95
	Anexo 7: Recuperadores de calor .....	100
	Anexo 8: Análisis de órdenes de magnitud de las resistencias térmicas .....	104
	Resistencia térmica del terreno .....	106

Resistencia de conducción del conducto .....	110
Resistencia de convección del aire.....	113
Resultado del cálculo de las resistencias térmicas de las instalaciones recopiladas .	120
Influencia de las distintas resistencias en el resultado global .....	126
Incertidumbres asociadas a las resistencias térmicas .....	127

## Lista de acrónimos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
COP	Coefficient of Performance
CTE	Código Técnico de la Edificación
EAHX	Earth-to-Air Heat Exchanger
ICTA	Intercambiador de Calor Tierra-Aire
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
NZEB	Near Zero Energy Building
RE	Real Decreto
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
TRT	Test de Respuesta Térmica
UTCE	Unidad Técnica de Construcción y Energía (Universidad de Zaragoza)
UE	Unión Europea

## Nomenclatura

### *Letras*

$A$	Superficie de intercambio térmico [m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Oscilación de la temperatura superficial [°C]
$C_p$	Capacidad térmica [J/kg·K]
$COP$	Coefficient of performance [-]
$D$	Diámetro [m]
$e$	Espesor [m]
$E$	Energía recuperada [J]
$f$	Factor de fricción [-]
$F$	Factor de forma [-]
$h$	Coefficiente de convección [W/m <sup>2</sup> ·K]
$h$	Entalpía [J/kg]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$n$	Número de conductos
$Nu$	Número de Nusselt [-]
$P$	Potencia [W]
$Pr$	Número de Prandtl [-]
$\dot{Q}$	Flujo de calor intercambiado [W]
$R$	Radio [m]
$R$	Resistencia térmica [K/W]
$R'$	Resistencia térmica por unidad de longitud [m·K/W]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$t$	Tiempo [días]
$t_o$	Desfase temporal [días]
$T$	Temperatura [°C o K]
$U_t$	Coefficiente global de intercambio de calor [W/m <sup>2</sup> ·K]
$v$	Velocidad [m/s]
$\dot{V}$	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
$x_{cd,t}$	Longitud de entrada térmica [m]
$z$	Profundidad de enterramiento [m]



### *Símbolos*

$\alpha$	Difusividad térmica del suelo [ $\text{m}^2/\text{día}$ ]
$\lambda$	Conductividad térmica [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
$\rho c$	Capacidad térmica volumétrica [ $\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ ]
$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido [ $\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}$ ]
$\rho$	Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Delta T_{lm}$	Media logarítmica de temperatura [K]

## Lista de gráficas

Gráfica 1 Variación de la temperatura del terreno respecto a la profundidad en Zaragoza. ....	25
Gráfica 2 Variación de la temperatura a distintas profundidades. ....	28
Gráfica 3 Salto térmico obtenido en función del diámetro del conducto. ....	32
Gráfica 4 Salto térmico obtenido en función de la longitud del conducto. ....	34
Gráfica 5 Temperatura del terreno con y sin intercambiador de calor tierra-aire.....	35
Gráfica 6 Salto térmico real obtenido en el edificio CIEM, año 2012. ....	36
Gráfica 7 Comparativa entre la temperatura del aire de salida simulada y real. ....	48
Gráfica 8 Comparativa entre el salto térmico simulado y real. ....	49
Gráfica 9 Temperatura de salida dependiendo de la conductividad térmica del terreno.. ....	53
Gráfica 10 Salto térmico dependiendo de la conductividad térmica del terreno. ....	54
Gráfica 11 Salto térmico y porcentajes de los tres casos considerados. ....	54
Gráfica 11 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro (mes de diciembre) del edificio CIEM. ....	56
Gráfica 12 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro (mes de julio) del edificio CIEM. ....	56
Gráfica 13 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro del edificio LUCIA (Valladolid). ....	57
Gráfica 14 Comparación de la temperatura de salida obtenida entre datos específicos de temperatura (año 2012) y datos generales (media AEMET, período 1981-2010). ....	58
Gráfica 15 Comparación del salto térmico obtenido entre datos específicos de temperatura (año 2012) y datos generales (media AEMET, período 1981-2010).....	59
Gráfica 16 Comparación de salto térmico obtenido de los años 2015 al 2019 frente a la media de AEMET (período 1981-2010). ....	60
Gráfica 17 Salto térmico obtenido respecto a la temperatura de entrada del aire, Edif. CIEM. ...	61
Gráfica 18 Salto térmico real obtenido en la instalación del Edificio CIEM (año 2012). ....	62
Gráfica 19 Tendencia de los climas presentes en las instalaciones de la bibliografía.....	90
Gráfica 20 Valores de los diámetros de conducto de las instalaciones de la bibliografía.. ....	91
Gráfica 21 Valores de longitud del conducto de las distintas instalaciones de la bibliografía. ....	92
Gráfica 22 Valores de profundidad de enterramiento de las instalaciones de la bibliografía.....	92
Gráfica 23 Resistencias de conducción por unidad de longitud dependiendo del tipo de roca. ....	106
Gráfica 24 Resistencia de conducción del terreno por unidad de longitud dependiendo del terreno. ....	107
Gráfica 25 Resistencia del terreno dependiendo del diámetro del conducto.....	108
Gráfica 26 Resistencia del terreno dependiendo de la longitud del conducto. ....	108
Gráfica 27 Resistencia del terreno dependiendo de la profundidad de enterramiento del conducto.....	109
Gráfica 28 Influencia del diámetro en la resistencia del conducto.....	111
Gráfica 29 Influencia de la longitud en la resistencia del conducto. ....	111
Gráfica 30 Influencia del espesor en la resistencia del conducto.. ....	112
Gráfica 31 Regiones térmicas del flujo convectivo en el interior de un conducto.....	113

Gráfica 32 Evolución de la resistencia del aire respecto del número de Reynolds.....	118
Gráfica 33 Resistencia térmica del aire en función del diámetro del conducto. ....	119
Gráfica 34 Resistencia térmica del aire en función del diámetro del conducto. ....	119
Gráfica 35 Valores de la resistencia térmica del aire de las instalaciones de la bibliografía. ....	123
Gráfica 36 Valores de la resistencia térmica del terreno de las instalaciones de la bibliografía. ....	124
Gráfica 37 Aportación de cada resistencia térmica a la resistencia global de la instalación. ....	125
Gráfica 38 Porcentajes de influencia de las distintas resistencias dependiendo de Re. ....	126

## Lista de figuras

Figura 1 Relación de los ODS con el presente trabajo de fin de grado. ....	14
Figura 2 Metodología aplicada para el presente Trabajo de Fin de Grado. ....	15
Figura 3 Emisiones de CO <sub>2</sub> globales a lo largo de los años.....	17
Figura 4 Distribución de consumo total de energía en residencias. ....	18
Figura 5 Ejemplo de una instalación con intercambiador tierra-aire y recuperador de calor. ....	23
Figura 6 Tendencia de los climas presentes en las instalaciones de la bibliografía.....	30
Figura 7 Disposición en anillo.....	30
Figura 8 Sistema Tichelmann .....	31
Figura 9 Diagrama de flujo para el dimensionado de la instalación. ....	32
Figura 10 Comparación entre un cimiento tradicional y la tipología Fondatherm (a) y los fenómenos físicos involucrados. ....	38
Figura 11 Esquema de una instalación con material con cambio de fase. ....	39
Figura 12 Esquema de uso del software de prediseño. ....	41
Figura 13 Tablas de datos de entrada del software de prediseño.....	42
Figura 14 Tabla de datos del salto térmico obtenido en el software de prediseño.....	42
Figura 15 Tabla de datos de la temperatura de salida obtenida en el software de prediseño. ....	43
Figura 16 Ejemplo de la tabla de la influencia de las resistencias térmicas en el software. ....	43
Figura 17 Configuración de un TRT .....	77
Figura 18 Esquema de la ubicación y numeración de los pozos canadienses de la Facultad de Filosofía, Unizar.....	78
Figura 19 Vista aérea y frontal del pozo de captación correspondiente al pozo número 4 (Geografía) .....	80
Figura 20 Conductos de PVC corrugados (negros) y lisos (naranjas). ....	80
Figura 21 Detalles de los conductos de ventilación de la facultad de Filosofía. ....	81
Figura 22 Instalación de los sistemas de climatización en la cubierta del edificio de Filosofía..	82
Figura 23 Sistema de ICTA con recuperador de calor.. ....	100
Figura 24 Diagrama de flujo de calor e isolíneas.. ....	104

## Lista de tablas

Tabla 1 Competencias desarrolladas a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado. ....	16
Tabla 2 Evolución de la normativa europea en materia de eficiencia energética. ....	19
Tabla 3 Caudales mínimos de ventilación en locales habitables.. ....	19
Tabla 4 Caudales mínimos de ventilación en locales no habitables.. ....	20
Tabla 5 Caudales mínimos por persona según el tipo de ambiente interior. ....	20
Tabla 6 Conductividad y capacidad térmica de diferentes tipos de sedimentos y rocas. ....	27
Tabla 7 Conductividad y difusividad térmica de distintos tipos de suelos. ....	29
Tabla 8 Conductividades térmicas de distintos materiales de conductos. ....	31
Tabla 9 Datos reales del intercambiador de calor del edificio CIEM (año 2012). ....	45
Tabla 10 Datos dimensionales de la instalación CIEM. ....	45
Tabla 11 Datos de la temperatura de entrada real del aire en la instalación CIEM. ....	46
Tabla 12 Datos de la temperatura de salida del ICTA simulado.. ....	46
Tabla 13 Datos de salto térmico obtenido del ICTA simulado. ....	47
Tabla 14 Comparación de resultados entre los datos de simulación y los datos reales. Fuente: ..	47
Tabla 15 Datos de la instalación del edificio CIEM utilizados en el análisis de sensibilidad. ....	51
Tabla 16 Conductividades térmicas del terreno usadas en los casos de estudio. ....	52
Tabla 17 Resultados de la simulación del salto térmico de los tres casos. ....	52
Tabla 18 Porcentaje de variación del salto térmico debido a la incertidumbre asociada a la conductividad térmica del terreno. ....	53
Tabla 19 Datos y porcentaje de variación dependiendo del diámetro. ....	55
Tabla 20 Tipos de conductos presentes en la instalación de Filosofía y Letras. ....	79
Tabla 21 Características dimensionales del intercambiador del edificio de la facultad de Filosofía. ....	79
Tabla 22 Recopilación de los datos de las instalaciones estudiadas. ....	85
Tabla 23 Grupos de climas presentes en las instalaciones. ....	90
Tabla 24 Valores habituales de los parámetros presentes en la bibliografía. ....	91
Tabla 25 Usos de los edificios de la bibliografía. ....	93
Tabla 26 Datos de COP de las instalaciones estudiadas en la bibliografía. ....	94
Tabla 27 Eficiencias y tipo de transferencia de calor de los distintos recuperadores de calor. ..	103
Tabla 28 Conductividades térmicas de los distintos materiales de los conductos.. ....	110
Tabla 29 Rangos de valores de las resistencias térmicas de distintos materiales. ....	110
Tabla 30 Datos de las características del aire.. ....	114
Tabla 31 Correlaciones para el cálculo del número de Nusselt en flujo interno. ....	115
Tabla 32 Resultados de las resistencias térmicas dependiendo de distintas correlaciones para el flujo turbulento. ....	116
Tabla 33 Resultado del cálculo de las resistencias térmicas de la bibliografía. ....	121
Tabla 34 Porcentajes de las distintas resistencias. ....	126



## 1. Introducción, metodología y objetivos

El punto de partida del siguiente Trabajo de Fin de Grado ha sido analizar y plantear la importancia y el peso de la ventilación y la climatización en los consumos energéticos de los edificios. La situación actual, tanto la descarbonización de la Unión Europea como la creada por la pandemia del COVID-19, ha supuesto un aumento en la importancia de la ventilación de los edificios, especialmente los públicos, lo cual exige que se implementen sistemas de mejora de la eficiencia energética para reducir el consumo.

Esta problemática está relacionada con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que la Unión Europea decretó en 2015, los cuales marcan los retos a mejorar en materias de igualdad, medio ambiente y prosperidad a cumplir para el año 2030. Uno de los grandes objetivos en motivos de clima y energía en la descarbonización de la Unión Europea y la mejora de la eficiencia energética, por lo que se decretaron las siguientes medidas [1]:

- 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (respecto a los niveles de 1990).
- al menos un 32% de cuota de energías renovables.
- al menos un 32,5% de mejora de la eficiencia energética [2].

En la siguiente ilustración se presentan los ODS relacionados con el presente Trabajo de Fin de Grado.



*Figura 1 Relación de los ODS con el presente trabajo de fin de grado. Fuente: elaboración propia.*

Con la meta de reducir la demanda energética de estos sistemas, se ha planteado la utilización de la temperatura casi constante del terreno a cierta profundidad como una alternativa para pre-acondicionar el aire de entrada a los edificios y disminuir el salto térmico a tratar en las unidades de tratamiento de aire. Junto con los intercambiadores de calor, un elemento clave en la instalación es el recuperador de calor.

El primer objetivo de este trabajo ha sido la realización de un estado del arte en el que se ha estudiado la transferencia de calor en el terreno y todos los fenómenos implicados, así como la

presencia de esta tecnología tanto en España como en el mundo. La metodología adoptada consta de dos bloques. El primer bloque se ha centrado en la revisión del estado de la problemática actual y la normativa aplicable, en la que se destacan dos partes diferenciadas, los requisitos de ventilación y la relativa a la eficiencia energética. El segundo bloque ha consistido en la realización del estado del arte de los intercambiadores de calor tierra-aire, en el que se ha estudiado los principios de intercambio de calor entre el aire y el terreno y se han recopilado los datos y resultados de distintas instalaciones.

Posteriormente, se ha considerado el trabajo desarrollado en los bloques anteriores para el planteamiento de una herramienta de prediseño de intercambiadores de calor tierra-aire. el objetivo de este software es ofrecer al potencial usuario un primer aproximamiento a esta tecnología y crear una herramienta fácil de utilizar. Se trata de una hoja Excel en la que, introduciendo los datos dimensionales, así como los climáticos y característicos del terreno, se obtienen como datos de salida, la estimación de la temperatura de salida del aire y el salto térmico. Posteriormente, se realizó la validación de este software mediante la comparación de los resultados obtenidos con los datos reales de una instalación y un análisis de sensibilidad con el objetivo de conocer las incertidumbres asociadas a los resultados. En la siguiente figura, se puede ver un esquema de la metodología utilizada.

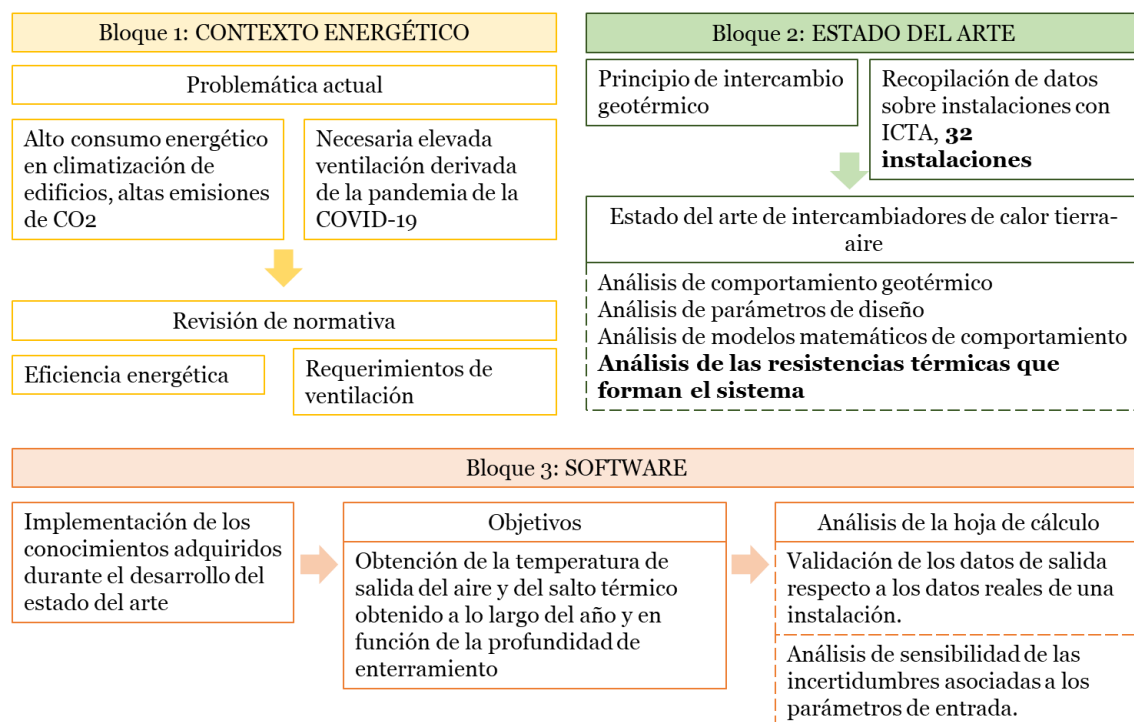


Figura 2 Metodología aplicada para el presente Trabajo de Fin de Grado. Fuente: elaboración propia.

Por último, destacar las competencias adquiridas mediante el aprendizaje durante el grado y su aplicación en todas las áreas de este trabajo, las cuales se pueden ver en la siguiente figura.



*Tabla 1 Competencias desarrolladas a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado. Fuente: elaboración propia.*

<b>Partes del trabajo</b>	<b>Competencias</b>
Revisión de la normativa.	C10, C11
Aprendizaje sobre la tecnología y recopilación de datos.	C10, C11
Análisis de los datos recopilados.	C10, C14
Elaboración del estado del arte.	C11, C14
Estudio de los mecanismos de transferencia de calor y análisis de las resistencias térmicas del sistema.	C13, C18, C19
Desarrollo del software.	C14, C18, C30
Competencias globales.	C3, C4, C6
<b>TRABAJO DE FIN DE GRADO</b>	<b>C41</b>

## 2. Contexto energético actual

Actualmente, el deterioro de la capa de ozono debido a las emisiones de dióxido de carbono es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la sociedad, la cual está ocasionada por el uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), las cuales constituyeron el 84,3% de la producción de energía en el año 2019 [3]. Esto unido a que la generación de energía ha incrementado una media de 1,6% durante los últimos 10 años [3], pone de manifiesto la necesidad de encontrar soluciones que reduzcan estas emisiones de manera más notoria para que se produzca un cambio y lograr el objetivo de limitar el aumento de calentamiento a 1,5°C del Acuerdo de París.

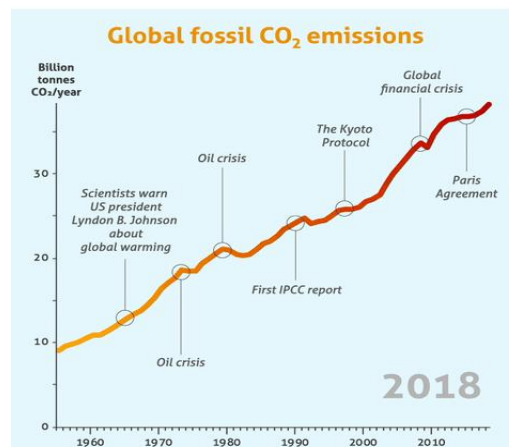
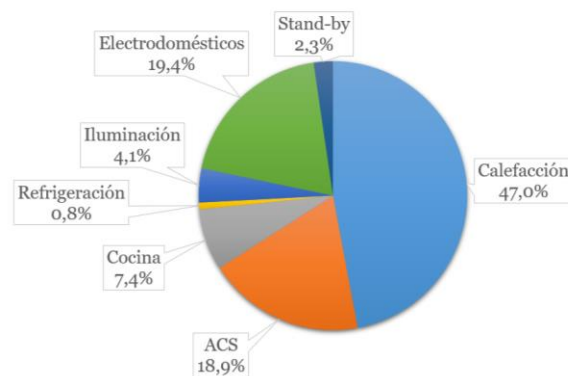


Figura 3 Emisiones de CO<sub>2</sub> globales a lo largo de los años. Fuente: <https://futureearth.org/>.

Los edificios (viviendas, oficinas, hospitales, edificios públicos...) suponen el 40% del consumo energético de la Unión Europea y el 36% de las emisiones de dióxido de carbono [4]. Teniendo en cuenta que el 75% del parque inmobiliario de la UE es energéticamente deficiente [4], la renovación de edificios supondría un descenso del 5-6% en el consumo total de energía de la UE y de un 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> [4].

Según Eurostat, en la UE, un 64.4% del consumo energético en edificios es destinado a climatización [6], siendo el principal uso de la energía en los hogares. En España, esta demanda es inferior, siendo un 47% del consumo total de una vivienda el destinado a climatización [7]. Lo que supone que aproximadamente el 25% de la energía generada se destine a la climatización de espacios.



*Figura 4 Distribución de consumo total de energía en residencias. Fuente: elaboración propia [5].*

Otro de los aspectos más importantes en la actualidad es la pandemia provocada por el COVID-19, que ha puesto en evidencia la importancia de la calidad del aire interior, así como la necesidad de una constante ventilación de los espacios interiores. La primera recomendación que se decretó como medida contra la propagación del virus fue un aumento de la ventilación en los edificios puesto que el parámetro más importante es la renovación de aire por ocupante [8], además de la ventilación ininterrumpida de los espacios, incluso cuando no estén siendo utilizados [9]. Todas estas medidas implican unos consumos superiores de energía para acondicionar este aire a niveles de confort térmico.

Esto pone de manifiesto que, ante la necesidad de aumentar la ventilación en los edificios y, a su vez, disminuir los consumos energéticos, se deben implementar sistemas de climatización más eficientes.

## 2.1. Objetivos de eficiencia energética en edificación

La Unión Europea decretó la primera directiva relativa al ahorro y la eficiencia energética en 1993 con la Directiva 93/76/CEE en la que se limitaba la emisión de CO<sub>2</sub> mediante la mejora de la eficiencia energética. Desde ese año en adelante, se produjeron distintos pasos en las directivas europeas, como se puede observar en la siguiente tabla que desembocaron en la Directiva 2010/31/UE/EPBD. Con el objetivo de conseguir un mejor uso de la energía en el sector terciario, especialmente en el sector residencial y en el sector servicios, se implementó la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo, donde se introdujo el concepto de Edificio de Energía Casi Nula o NZEB (Near Zero Energy Building) [11] y una serie de sistemas de referencia, certificaciones y planes nacionales para cumplir los objetivos de eficiencia energética marcados.

Tabla 2 Evolución de la normativa europea en materia de eficiencia energética. Fuente: elaboración propia.

Unión Europea								
1993	2002	2006	2009	2010	2012	2016	2018	2019
Directiva 93/76/CCE	Directiva 2002/91/CE/EP BD	Directiva 2006/32/CE	Directiva 2009/28/CE	Directiva 2010/31/UE Directiva 2010/30/EU	Directiva 2012/27/CE	Recomendación 2016/1318/UE	Directiva 2018/844/UE Directiva 2018/2002/UE	Recomendación 2019/786/UE Recomendación 2019/1658/UE
Limitación de emisiones de CO <sub>2</sub> mediante la mejora de la eficiencia energética.	Eficiencia energética de los edificios.	Eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos.	Fomento del uso de energía de fuentes renovables.	Eficiencia energética de los edificios.	Eficiencia energética.	Promover edificios de consumo energético casi nulo (nZEB).	Acelerar la renovación rentable de edificios existentes.	Renovación de edificios y transposición de las obligaciones de ahorro de energía.

España										
1999	2006	2007	2009	2011	2013	2016	2017	2018	2019	2021
Ley 38/1999	RD 314/2006	RD 47/2007 RD 1027/2007 (RITE)	RD 1826/2009	ISO 50001/2011	RD 235/2013 FOM RD 1635/2013 RD 238/2013	RD 26/2016	FOM 586/2017 (CTE) RD 564/2017	ISO 50001/2018	RD 732/2019	RD 178/2021
Nacimiento del CTE.	Aprobación del CTE.	Aprobación de la certificación energética de los edificios y del RITE.	Modificación del RITE.	Requisitos de Sistemas de Gestión de Energía.	Certificación de la eficiencia energética de los edificios y modificación del CTE y RITE.	Auditorías energéticas en empresas grandes cubriendo el 85% del consumo.	Modificación del CTE y certificación de la eficiencia energética de los edificios.	Modificación de Sistemas de Gestión de la Energía.	Modificación del CTE.	Actualización del RITE.

## 2.2. Normativa vigente en España para el diseño de ICTA

La normativa relativa a la construcción de los intercambiadores tierra-aire es la relacionada con la calidad del aire en el interior de los edificios. A continuación, se detallan las normas y documentos relacionados con el diseño de un intercambiador de calor tierra-aire, se describen los caudales mínimos de ventilación dependiendo del tipo de edificio (CTE, RITE), un método de diseño para su cálculo (UNE-EN 16798-5-1:2018).

### 1. Código Técnico de la Edificación, CTE

Este documento dictamina las condiciones de salubridad en su sección 3 (CTE DB HS 3) [12], donde se establecen los caudales mínimos de ventilación dependiendo del tipo de estancia y si es una zona habitable o no.

Tabla 3 Caudales mínimos de ventilación en locales habitables. Fuente: CTE-DB-HS3 [12].

Caudal mínimo en L/s					
Tipo de vivienda	Locales secos			Locales húmedos	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores	Mínimo en total	Mínimo por local
0-1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

Tabla 4 Caudales mínimos de ventilación en locales no habitables. Fuente: CTE-DB-HS3 [12].

Caudal mínimo en l/s		
Local	Por m <sup>2</sup> útil	En función de otros parámetros
Trasteros y zonas comunes	0,7	-
Aparcamientos y garajes	-	120/plaza
Almacenes de residuos	10	-

## 2. Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios, RITE

El Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios [13] [14] indica para que tipo de zonas es aplicable el CTE DB HS3 y para los casos no contemplados en el CTE indica las siguientes categorías:

Tabla 5 Caudales mínimos por persona según el tipo de ambiente interior. Fuente: RITE [13].

Categoría	Tipo de edificio	l/s por persona
IDA 1 Calidad óptima	Hospitales, clínicas, laboratorios, guarderías y similares.	20
IDA 2 Calidad buena	Oficinas, residencias (estudiantes y ancianos), locales comunes de edificios hoteleros, salas de lecturas, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza, piscina y similares.	12,5
IDA 3 Calidad media	Edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de edificios hoteleros, restaurantes o cafeterías, bares, salas de fiesta, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas), salas de ordenadores y similares.	8
IDA 4 Calidad baja	Nunca se empleará, salvo en casos especiales debidamente justificados.	5

El RITE a su vez indica los filtros recomendados en la instalación de una máquina térmica, en el caso de un intercambiador se colocarían al final, siendo la clase mínima F6. También se recomienda la instalación de este mismo filtro en la entrada de aire exterior del intercambiador.

## 3. Norma UNE-EN 16798-5-1:2018

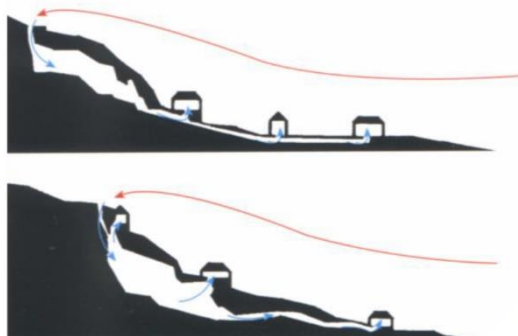
Esta norma [15] trata sobre métodos de cálculo de las demandas energéticas de los sistemas de ventilación y de acondicionamiento de aire, en concreto, en su anexo C desarrolla un método de cálculo del pre-calentamiento y pre-enfriamiento por el terreno. En el caso de este trabajo de fin de grado, no se ha aplicado esta norma, sino que el método utilizado para el cálculo del salto térmico ha sido basado en las resistencias térmicas del terreno puesto que se tenía como objetivo el estudio de las influencias de todos los parámetros en cada una de las resistencias térmicas y en la norma, los coeficientes de cálculo no están basados en este método.

### 3. Estado del arte

#### 3.1. Origen y antecedentes

El aprovechamiento de las condiciones de las cuevas, tanto de confort térmico como de protección ante agentes externos, se usa desde la antigüedad. En la Prehistoria, las cuevas eran usadas como cobijo y se dio un paso más allá con la creación de las llamadas casas-cueva, donde se acondicionaba el interior como vivienda, aprovechando las condiciones térmicas proporcionadas. Un ejemplo de este tipo de construcciones es la ciudad de Capadocia, Turquía o pueblos como Guadix, Málaga, donde se siguen usando actualmente este tipo de construcciones. Otros ejemplos de aprovechamiento térmico del suelo son las ciudades subterráneas. La ciudad de Nevsehir, Turquía, tiene más de 5000 años de antigüedad y cuenta con siete kilómetros de túneles y galerías.

Las villas en Costozza (Vicenza, Italia), construidas en el siglo XVI, son unas de las primeras edificaciones en utilizar un concepto de intercambiador de calor tierra-aire similar al que se usa en la actualidad. Estas villas están construidas sobre una gran caverna natural en el interior de la montaña. Aprovechando las aberturas en la montaña, se introducía aire y se reconducía por la galería, de este modo se preacondicionaba antes de introducirlo en las villas [16].



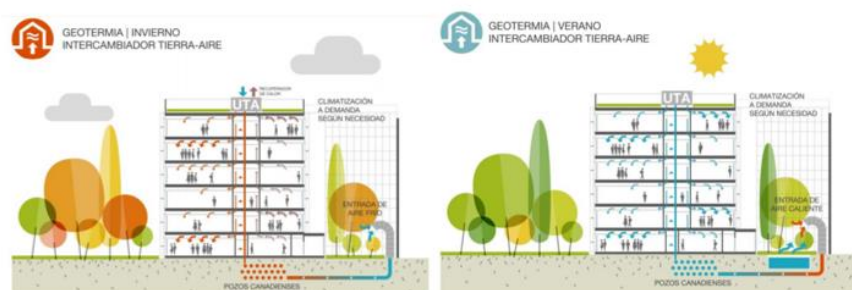
*Ilustración 1 Sistema de ventilación natural en las villas de Costozza, Vicenza, Italia. Fuente: <http://klimagerechtesbauen.blogspot.com>*

Posteriormente, se procedió a construir estas galerías de manera artificial, con canalizaciones de piedra con una abertura al aire exterior y otra al interior del edificio. De manera coloquial, se les denominaba de dos maneras diferentes, *pozo provenzal* si estaba destinado a preenfriamiento de aire en verano y *pozo canadiense* si su uso era para precalentar el aire en invierno. Pese a esta distinción, a nivel constructivo ambos son iguales.

Fue a partir de finales del siglo XX cuando se produjo un gran progreso en la caracterización de esta tecnología, desarrollándose modelos teóricos sobre su eficacia en función del clima, del tipo de terreno y de la profundidad de enterramiento.

En España se pueden encontrar diferentes ejemplos que hacen uso de esta tecnología. El primer edificio reconocido como cero emisiones en España se trata de la sede de ACCIONA en Pamplona, construido en 2007, cuenta con este sistema de ventilación [17]. Otro ejemplo de Edificio de Consumo Casi Nulo que cuenta con un ICTA es el edificio CIEM [18] [19], situado en Zaragoza, construido en el año 2010, alberga un vivero de empresas tecnológicas de nueva

creación. También cabe destacar el edificio LUCIA (Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada), 2014, de la Universidad de Valladolid, se trata de un edificio diseñado para tener un balance cero de CO<sub>2</sub>, su diseño bioclimático cuenta con un intercambiador tierra-aire junto con otros sistemas de eficiencia energética [20].



*Ilustración 2 Ventilación en invierno y verano del edificio LUCIA, Valladolid. Fuente: Francisco Valbuena García.*

Como ejemplo de edificio de viviendas, el edificio Hemisferio Solar situado en Móstoles, cuenta con un sistema de doble galería, una de impulsión y otra de admisión, conectadas entre sí con pequeños intercambiadores [21]. Mencionar también el centro cultural Daoiz y Velarde (Madrid, 2013), puesto que se trata de un edificio rehabilitado en el que el intercambiador se sitúa en su totalidad debajo del edificio al no disponer de suelo exterior [22]. Los datos de dimensionado de las instalaciones mencionadas anteriormente se encuentran recogidas en el anexo xx, destacar que no se dispone de todos los datos de cada una de las instalaciones.

### 3.2. Concepto de intercambiador de calor tierra-aire

Un intercambiador tierra-aire consiste en una serie de conductos enterrados a cierta profundidad por los que se hace circular aire con el propósito de intercambiar calor con el terreno que le rodea. El sistema es un circuito abierto donde el aire de ventilación se toma del exterior mediante un sistema de impulsión (ventiladores) y se circula por el intercambiador, de modo que cuando salga de él y entre al edificio, la temperatura del aire sea más próxima a la temperatura de confort deseada en el interior.

El objetivo de esta configuración es aprovechar la inercia térmica del suelo para acondicionar el aire de entrada a un edificio, precalentar en invierno y preenfriar en verano. Esta inercia térmica se debe al gradiente geotérmico que se forma en el terreno dependiendo de la profundidad. En el caso de este intercambiador, se aprovecha la temperatura prácticamente constante del terreno a una profundidad de 8-10 metros para preconditionar el aire de ventilación con el objetivo de disminuir la demanda energética relativa a la climatización del edificio. Su uso se ha extendido particularmente en los invernaderos, donde permite un ahorro de más del 45% en su demanda energética y en edificios públicos [23]. La adición de recuperadores de calor en la instalación es un factor muy influyente en el comportamiento global del sistema puesto que aprovecha el calor

residual de aire de expulsión y eleva el salto térmico, en el anexo 7 se ha recopilado información del principio teórico de estos sistemas, así como los distintos tipos de recuperadores.

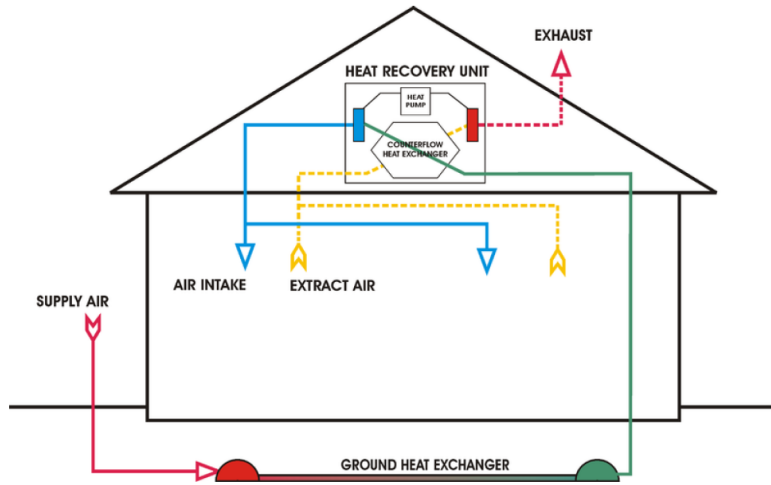


Figura 5 Ejemplo de una instalación con intercambiador tierra-aire y recuperador de calor. Fuente: Javier Rey [19]

### 3.3. Principio de funcionamiento

El proceso físico que ocurre en los intercambiadores de calor tierra-aire se trata de una transferencia de calor entre el aire que se ha introducido y el terreno que rodea a los conductos. El intercambio de calor transferido al aire a través del conducto enterrado en el terreno se puede describir con la siguiente fórmula [24]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot (T_{aire,salida} - T_{aire,entrada})$$

Donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor intercambiado con el aire [W]

$\dot{m}_{aire}$  es el caudal de aire que atraviesa el conducto [kg/s]

$c_{p,aire}$  es la capacidad térmica del aire [J/kg·K]

$T_{aire,salida}$  es la temperatura del aire a la salida del conducto [K]

$T_{aire,entrada}$  es la temperatura del aire a la entrada del conducto [K]

Otra manera de definir el intercambio entre el aire y el terreno es de la siguiente manera [24]:

$$\dot{Q} = U_T \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

Donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor intercambiado con el aire [W]

$U_T$  es el coeficiente global de intercambio de calor [W/m²·K]

$A$  es la superficie de intercambio de calor [m²]

$\Delta T_{lm}$  es la media logarítmica de la temperatura [K]



El coeficiente global de transferencia,  $U_T$ , se calcula como el inverso de la resistencia térmica global del sistema por el área de intercambio térmico [24]. En este caso, la resistencia total está compuesta por la resistencia de convección del aire, la resistencia de conducción del conducto y la resistencia de conducción del terreno, en el anexo 8 esta recopilada toda la información del cálculo de estas resistencias, así como los conceptos teóricos. Siendo la resistencia total:

$$R_T = R_{aire} + R_{conducto} + R_{terreno}$$

Y el coeficiente global de transferencia:

$$U_T = \frac{1}{R_T \cdot A}$$

Donde:

$R_T$  es la resistencia térmica total [K/W]

$R_{aire}$  es la resistencia térmica del aire [K/W]

$R_{conducto}$  es la resistencia térmica del conducto [K/W]

$R_{terreno}$  es la resistencia térmica del terreno [K/W]

$A$  es el área de intercambio térmico [m<sup>2</sup>]

La media logarítmica de temperatura se calcula con la siguiente fórmula [24]:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{aire,entrada} - T_{pared})(T_{aire,salida} - T_{pared})}{\ln\left(\frac{T_{aire,entrada} - T_{pared}}{T_{aire,salida} - T_{pared}}\right)} = \frac{(T_{aire,entrada} - T_{aire,salida})}{\ln\left(\frac{T_{aire,entrada} - T_{pared}}{T_{aire,salida} - T_{pared}}\right)}$$

Donde:

$T_{aire,entrada}$  es la temperatura del aire a la entrada del conducto [K]

$T_{aire,salida}$  es la temperatura del aire a la salida del conducto [K]

$T_{pared}$  es la temperatura de la pared del conducto [K], la cual se puede aproximar como la temperatura del terreno ( $T_{pared} = T_{terreno}$ )

Si se igualan las ecuaciones de transferencia de calor descritas anteriormente, la temperatura de salida del aire queda de la siguiente manera:

$$T_{aire,salida} = T_{pared} + (T_{aire,entrada} - T_{pared}) \cdot e^{\frac{-U_T \cdot A}{\dot{m}_{aire} \cdot c_{p,aire}}}$$

En este proceso se ha tenido en cuenta únicamente el intercambio de calor sensible, despreciando el aporte del posible calor latente, esto se debe a dos motivos: la simplificación de los cálculos y la dificultad de conocer la cantidad de humedad en el aire puesto que depende de las condiciones climáticas de la ubicación.

Una vez conocido el proceso, el diseñador de la instalación únicamente tendrá que escoger los valores de diámetro, longitud y número de conductos, así como su material, puesto que el resto de los parámetros de la instalación están determinados por la normativa o condiciones externas (como son el caudal de la instalación o, por ejemplo, una restricción en la superficie disponible

para albergar el intercambiador) o por aproximaciones de cálculo (la temperatura del terreno y la conductividad térmica del terreno).

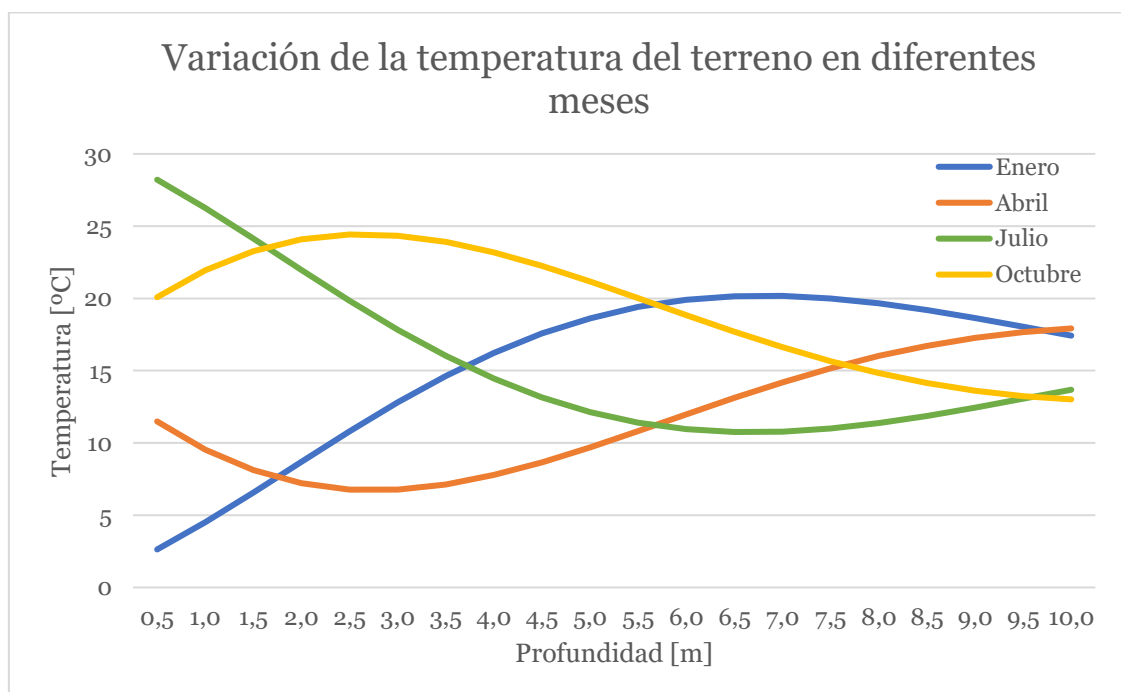
### 3.3.1. Condiciones del terreno

#### *Profundidad*

La temperatura del terreno está influenciada por la profundidad, la radiación solar y los distintos fenómenos meteorológicos, todo ello genera unos perfiles de temperatura a lo largo del año.

Se diferencian tres profundidades típicas [25] (salvo en zonas de actividad geotérmica inusual). Hasta los 10-12 m la temperatura del terreno está determinada por el intercambio térmico con la atmósfera y el sol. Entre los 10-12m y 60-80 m, temperatura se mantiene prácticamente constante y en profundidades superiores, la temperatura incrementa con la profundidad con un gradiente geotérmico estimado de entre 15 y 30°C/km [25]. Estos valores pueden sufrir alteraciones en zonas relacionadas con aguas subterráneas, existencia de sistemas kársticos, etc.

En el caso de los intercambiadores de calor tierra-aire, la zona de interés son las capas superficiales. La temperatura de estas capas como se ha comentado anteriormente está influenciada por la atmósfera y la profundidad, lo cual provoca una variabilidad en la temperatura que se va reduciendo hasta ser constante alrededor de los 10 metros de profundidad, como se puede ver ilustrado en la siguiente gráfica, además se crea un desfase temporal debido a la inercia térmica del suelo, como se puede observar en la gráfica 1.



Gráfica 1 Variación de la temperatura del terreno respecto a la profundidad en Zaragoza. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía. [25] [26]

Aunque lo ideal sería tener mediciones de la temperatura a distintas profundidades, ya sea mediante un test de respuesta térmica o una medición mediante conductímetro (anexos 2 y 4, respectivamente), esto no siempre es posible. Es por ello que la temperatura del terreno

respecto a la profundidad se calcula mediante el siguiente método propuesto por el IDAE [25], considerando el terreno homogéneo:

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{365} \left( t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha\pi}} \right) \right)$$

Donde:

$T(z, t)$  es la temperatura del terreno [°C] a una profundidad  $z$  (m) y un momento del año  $t$  [horas]

$T_m$  es la temperatura anual del suelo [°C] a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura

$A_s$  es la oscilación de la temperatura superficial [°C]

$t$  es el tiempo [días]

$t_o$  es el desfase [días]

$\alpha$  es la difusividad térmica del suelo [m<sup>2</sup>/día]

La oscilación térmica,  $A_s$ , depende de la localización y las condiciones climáticas; el desfase se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad, el cual está ilustrado mediante el análisis de Kusuda, cuyo valor típico es 35±10 días. Para el valor de  $T_m$ , en el caso de España, a una profundidad de 10-15 metros, la temperatura del terreno se estabiliza y tiene un promedio anual de entre 10 y 15°C, dependiendo de la ubicación [25].

Adicionalmente, se ha estudiado la influencia de la profundidad en la resistencia térmica del terreno, la cual aumenta proporcionalmente con el incremento de la profundidad, por tanto, se tendrá que encontrar el valor óptimo de profundidad que proporcione una temperatura del terreno adecuada para lograr el salto térmico a la vez que minimice la resistencia térmica.

### *Propiedades térmicas del terreno*

Para que se produzca un buen intercambio de calor, se debe tener en cuenta el tipo de suelo presente en la instalación. Son tres las propiedades térmicas del terreno que se deben considerar para la instalación de un ICTA: la conductividad térmica, la capacidad calorífica específica y la difusividad térmica. Es importante mencionar que estas propiedades se ven favorecidas cuanto mayor es la compactación del suelo.

### *Conductividad térmica*

La conductividad térmica  $\lambda$  [W/m·K] es definida como la capacidad de transmitir calor mediante el mecanismo de conducción, es decir, *‘para un gradiente de temperatura dado, el flujo de calor aumenta con el incremento de la conductividad térmica’* [24]. La conductividad térmica del terreno es el parámetro limitante en el diseño de un ICTA, por lo tanto, se debe caracterizar el suelo de manera precisa según el tipo de sedimento y las rocas presentes, así como las

variaciones de las propiedades físicas desde un punto de vista térmico. Para ello se usan diferentes métodos:

- Analizar una muestra de terreno en laboratorio mediante un conductivímetro, es el más recomendado para este tipo de instalaciones y su procedimiento está explicado en el anexo 4.
- El test de respuesta térmica, TRT, es el más recomendado para instalaciones de bombas de calor acopladas al terreno y su procedimiento está explicado en el anexo 2.
- Estimar sus propiedades a través de tablas.

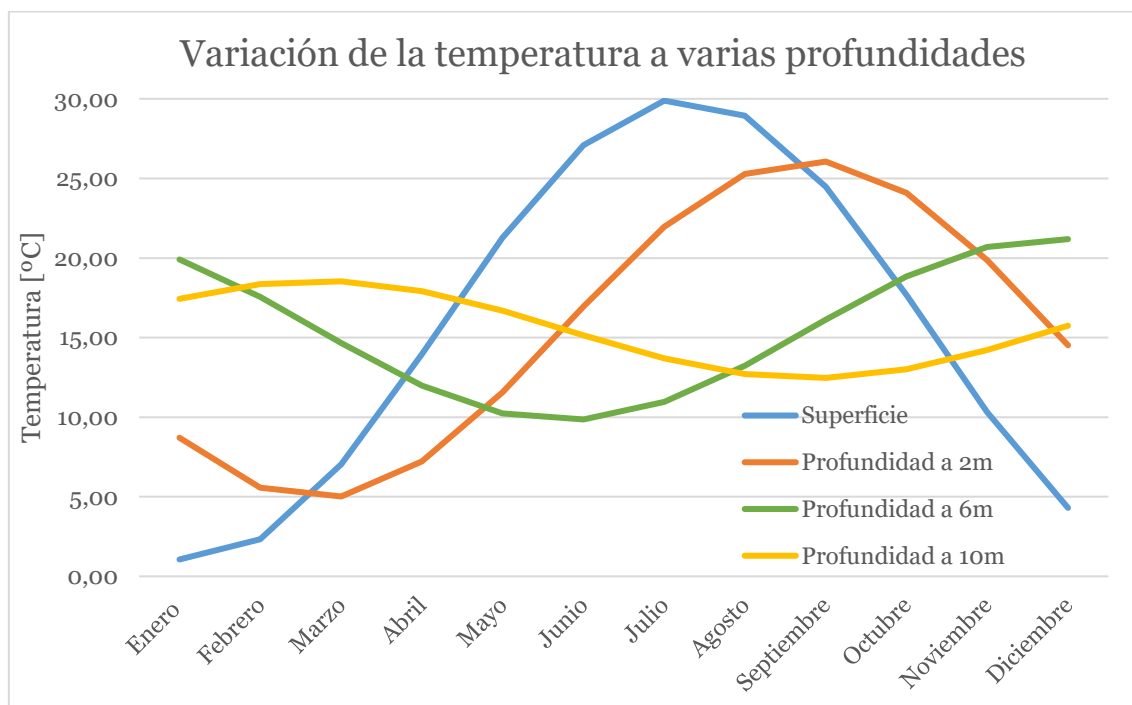
En la siguiente tabla se pueden observar conductividades y capacidades térmicas volumétricas de diferentes tipos de suelos [27]:

*Tabla 6 Conductividad y capacidad térmica de diferentes tipos de sedimentos y rocas. Fuente: Pahud, 2002 [27].*

Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]			Capacidad máxima volumétrica [MJ/m³K]
	Mínimo	Valor típico	Máximo	
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Periodita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		Aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava saturada de agua		Aprox. 1,8		Aprox. 2,4
Arena seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	Aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	Aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0-20°C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+10°C)		0,58		4,19

### Capacidad térmica volumétrica

La capacidad térmica volumétrica  $\rho c$  [J/m<sup>3</sup>·K] es la cantidad de energía térmica que puede almacenar el material por unidad de volumen y por cada grado que varía su temperatura [24]. Cuando se habla de esta propiedad en un ICTA, cuanto mayor sea el valor de capacidad térmica, mayor será la oposición a que cambie su temperatura, lo cual se denomina también inercia térmica. Esta inercia térmica crea un desfase temporal, tanto entre estaciones como entre el día y la noche, que es preferible que sea elevado [23]. Este fenómeno se puede observar en la siguiente gráfica, donde se puede ver que, para profundidades superiores, la curva se atenúa y se desplaza en el tiempo:



Gráfica 2 Variación de la temperatura a distintas profundidades. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía. [19] [20]

### Difusividad térmica

La difusividad térmica  $\alpha$  es el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno [24].

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Tiene una gran importancia a la hora de dimensionar el intercambiador debido a que expresa la velocidad de cambio de la temperatura en un material hasta alcanzar el equilibrio. Este parámetro influye en el cálculo de la temperatura del terreno en función de la profundidad.

En la siguiente tabla se pueden observar distintos valores conductividad y difusividad térmicas dependiendo del tipo de suelo:

Tabla 7 Conductividad y difusividad térmica de distintos tipos de suelos. Fuente: Labs y Harrington, 1982 [28].

Tipo de suelo	Húmedo	Rocoso	Húmedo y compacto	Seco y compacto	Húmedo y ligero	Seco y ligero
$\lambda$ [W/mK]	2,4	2,4	1,3	0,87	0,87	0,35
$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$1,02 \times 10^{-6}$	$1,02 \times 10^{-6}$	$0,64 \times 10^{-6}$	$0,52 \times 10^{-6}$	$0,52 \times 10^{-6}$	$0,29 \times 10^{-6}$

Las propiedades físicas y térmicas del terreno escogido se pueden favorecer mediante la inclusión de otros componentes como pueden ser bentonita, arenas o arcillas. La adición de bentonita o arenas estabiliza el intercambio de calor y mejora el rendimiento energético [29] y la incorporación de arcillas atrae una mayor humedad, provocando un aumento en la conductividad térmica, con es el caso de la instalación de la Facultad de Filosofía de la Universidad de Zaragoza.

### Condiciones climáticas

Este tipo de sistemas también se ven altamente influenciados por la zona geográfica en la que se encuentran puesto que marcara los máximos y mínimos medios de temperatura. Es preferible climas extremos, donde haya una gran variación entre el día y la noche, así como entre estaciones, puesto que se aprovecha más el efecto de la inercia térmica debido a la acumulación de energía en los períodos intermedios [23]. Los climas húmedos suponen la incorporación de deshumidificadores para crear las condiciones de confort adecuadas antes de impulsar el aire al interior del edificio. El caso contrario ocurre en los climas secos, donde puede ser necesario la incorporación de sistemas para elevar la humedad del aire y llegar a las condiciones de confort, por ejemplo mediante refrigeración evaporativa, donde se enfría la corriente de aire mediante la inclusión y evaporación de una corriente de agua. Existen sistemas directos como indirectos de intercambio de calor entre la corriente de aire y la de agua, en este caso, sería más adecuado un sistema directo puesto que el objetivo final es el incremento de humedad en el aire [30].

Las instalaciones de la bibliografía están emplazadas en distintos climas, es por ello que se ha hecho un estudio del tipo de clima predominante. Se han recopilado los datos de las 32 instalaciones y se han agrupado en base a los cinco grandes grupos de climas según la clasificación climática de Köppen [31], en la tabla 22 en el anexo 5 se pueden consultar el número de instalaciones presentes en cada clima, de ella se ha obtenido el siguiente gráfico que ilustra la tendencia:

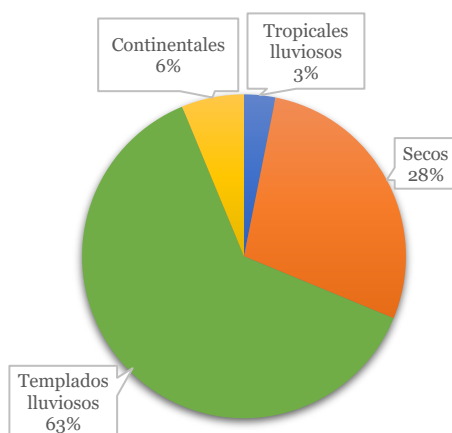


Figura 6 Tendencia de los climas presentes en las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Diseño y elementos de la instalación

#### *Tipos de instalaciones*

El primer paso a tener en cuenta en el diseño de un intercambiador de calor es la situación y diseño del conjunto de conductos. Este tipo de instalaciones requieren grandes superficies y por lo tanto, los conductos pueden situarse debajo o en las inmediaciones del edificio, dependiendo de la cantidad de superficie disponible. La disposición puede ser vertical u horizontal, aunque es habitual que se elija esta última debido a que los costes de ejecución y obra son considerablemente inferiores. Considerando las instalaciones horizontales, existen dos tipologías:

#### *Disposición en anillo*

Se trata de un único conducto enterrado a una profundidad aproximada de dos metros que se dispone alrededor del edificio. Está recomendado en viviendas unifamiliares o edificios de pequeñas dimensiones, siendo el caudal óptimo de entre 150 y 300 m<sup>3</sup>/h [32].

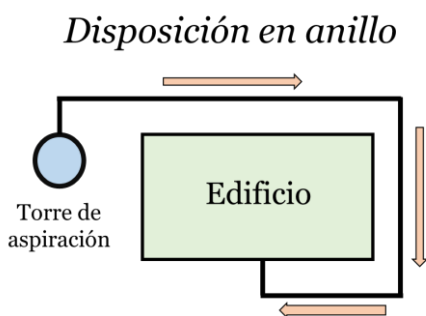
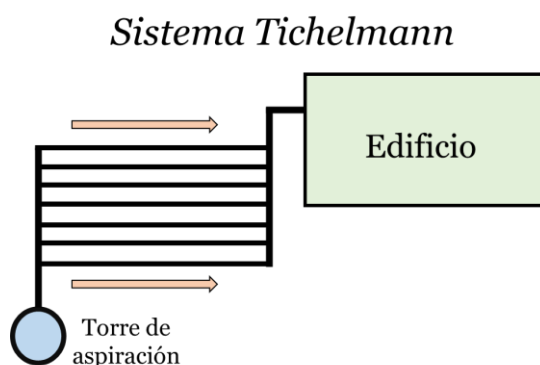


Figura 7 Disposición en anillo. Fuente: elaboración propia.

#### *Sistema Tichelmann*

Su disposición con un número elevado de conductos situados en rejilla permite la ventilación con caudales superiores a 300 m<sup>3</sup>/h, por ello es un modelo habitual en edificios grandes. Se puede disponer de una sola fila de conductos o varias a distintas profundidades dependiendo de los requerimientos de ventilación [32]. Este diseño busca un autoequilibrado hidráulico, de este

modo, dividiendo el caudal total en diferentes trayectorias se consigue un mayor intercambio de calor al aumentar la superficie de intercambio y en especial, se reduce la pérdida de carga, al disminuir la longitud de los conductos.



*Figura 8 Sistema Tichelmann. Fuente: elaboración propia.*

### *Materiales*

Los conductos de la instalación pueden ser de distintos materiales, pero deben ser adecuados en términos de resistencia a compresión, conductividad térmica y estanqueidad. Normalmente, se escoge el material dependiendo de las características de la instalación, así como de las cargas que tengan que soportar. Los materiales más habituales observados en la bibliografía son: PVC, polipropileno, hormigón en masa y acero inoxidable. El material que peor comportamiento tiene es el plástico, a pesar de ello, es un material habitual en estas instalaciones debido a que el conducto es el elemento menos influyente y, por lo tanto, la diferencia entre unos materiales y otros no afecta de manera significativa a la resistencia térmica total.

*Tabla 8 Conductividades térmicas de distintos materiales de conductos. Fuente: Código Técnico de la Edificación [12].*

Material	Conductividad térmica [W/mK]
PVC	0,17
Polipropileno	0,22
Hormigón en masa	0,8-1,9
Acero inoxidable	14,2-15,1

### *Dimensionado de la instalación*

Una vez conocidos los parámetros fijos del intercambiador, es decir, el caudal de aire, las características del terreno, las condiciones climáticas, la profundidad de enterramiento y el material de los conductos, se dimensionan el resto de los parámetros como son el diámetro, el espesor, la longitud y el número de conductos.



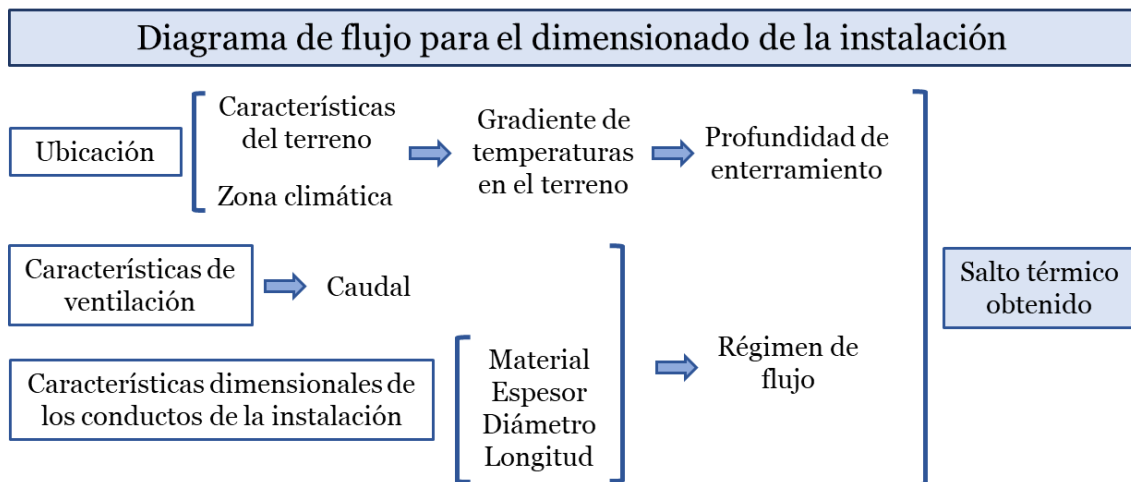
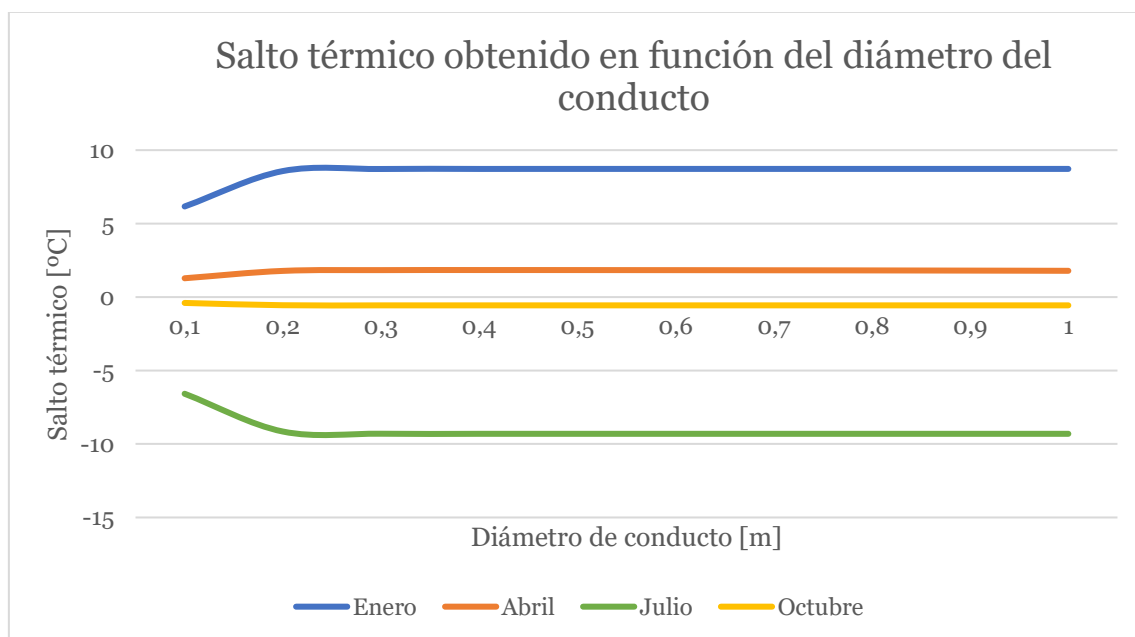


Figura 9 Diagrama de flujo para el dimensionado de la instalación. Fuente: elaboración propia.

### Diámetro

En primer lugar, se debe escoger el diámetro del conducto, el cual está estrechamente relacionado con el caudal de ventilación. Además, el diámetro influye en el coeficiente de transferencia convectivo, por ello se recomiendan diámetros pequeños para incrementar el flujo de transferencia de calor [33]. El rango adecuado es de 0,2 m a 0,6 m [23]. En la gráfica siguiente se ilustra como a partir de los 0,2 m, el salto térmico se estabiliza.



Gráfica 3 Salto térmico obtenido en función del diámetro del conducto. Fuente: elaboración propia.

En edificios grandes con caudales elevados como pueden ser hoteles o centros comerciales, se podría llegar a 1 m de diámetro, a partir de este valor el intercambio de calor con el centro del conducto pierde eficiencia y no se realiza correctamente.

El análisis de resistencias térmicas indica que un mayor diámetro disminuye tanto la resistencia del conducto como la del terreno, sin embargo, para la resistencia del aire, un menor diámetro es más favorable puesto que aumenta el número de Reynolds y favorece la transferencia de

calor, disminuyendo la resistencia. Teniendo en cuenta estas consideraciones y sabiendo que la resistencia del aire es la más significativa y sobre la que más se puede influir, un menor diámetro es recomendado, lo cual ratifica lo estudiado en la bibliografía. Posteriormente, el análisis de sensibilidad del software (desarrollado en el apartado 4.3. de esta memoria) demostró que para las instalaciones existe un diámetro óptimo que maximiza el salto térmico obtenido.

#### *Espesor*

Idealmente, las paredes de los conductos deberían ser membranas sin espesor, de este modo, la pérdida de calor en ellos no existiría. En la práctica, esto no puede ser así puesto que los conductos deben soportar las cargas a los que están sometidos. Por ello, el espesor adecuado es el mínimo que garantice soportar las cargas y posibilite el máximo intercambio de calor. Dependiendo del material utilizado en los conductos, este valor puede variar, por lo tanto, no se puede dar un rango de valores. En el anexo 8, análisis de resistencias térmicas, se analiza e ilustra la influencia de este parámetro en el valor de la resistencia térmica del conducto, la cual crece proporcionalmente con el espesor, lo que pone de manifiesto que lo más adecuado es minimizar este parámetro. Sin embargo, los datos calculados ilustran que el porcentaje de influencia del conducto es alrededor del 0,4% de la resistencia total, por tanto, se llega a la conclusión de que la resistencia del conducto es la que menos influencia tiene en la resistencia total del conjunto y podría considerarse despreciable.

#### *Número de conductos*

Una vez conocidos los valores de diámetro y espesor, se debe calcular el número de conductos dependiendo del caudal de ventilación requerido, este caudal está determinado por el Código Técnico de la Edificación y por el RITE dependiendo del tipo de edificio. Además, se debe escoger la velocidad del aire que circula por los conductos, teniendo en cuenta que la velocidad es directamente proporcional al caudal pero inversamente proporcional al intercambio de calor. Por ello se deberá encontrar un valor intermedio que satisfaga ambas condiciones, los valores recomendados de velocidad son entre 2 y 3 m/s [32], este rango de valores garantiza un buen intercambio de calor. Por debajo de 1 m/s existiría flujo laminar (considerando los parámetros habituales de dimensionamiento), el cual tiene una peor transmisión de calor y por encima de 4m/s el tiempo de residencia disminuye, creando un aumento en la caída de presión. El análisis de los datos de la bibliografía demuestra que el flujo ideal es el turbulento, ya que alrededor del 85% de las instalaciones aseguran este tipo de flujo.

Una vez conocidos el valor del caudal total de ventilación, la velocidad del aire y el área de la sección del conducto se procederá a calcular el caudal que pasa por cada conducto y posteriormente, el número de conductos como el número entero más cercano de la división del caudal total y el caudal del conducto.

$$\dot{V}_{conducto} = \text{Área} * v \rightarrow n = \frac{\dot{V}_T}{\dot{V}_{conducto}}$$

Donde:

$\dot{V}_{conducto}$  es el caudal que atraviesa cada conducto [ $m^3/s$ ]

$\dot{A}rea$  es el área de la sección del conducto [ $m^2$ ]

$v$  es la velocidad del aire que atraviesa el conducto [ $m/s$ ]

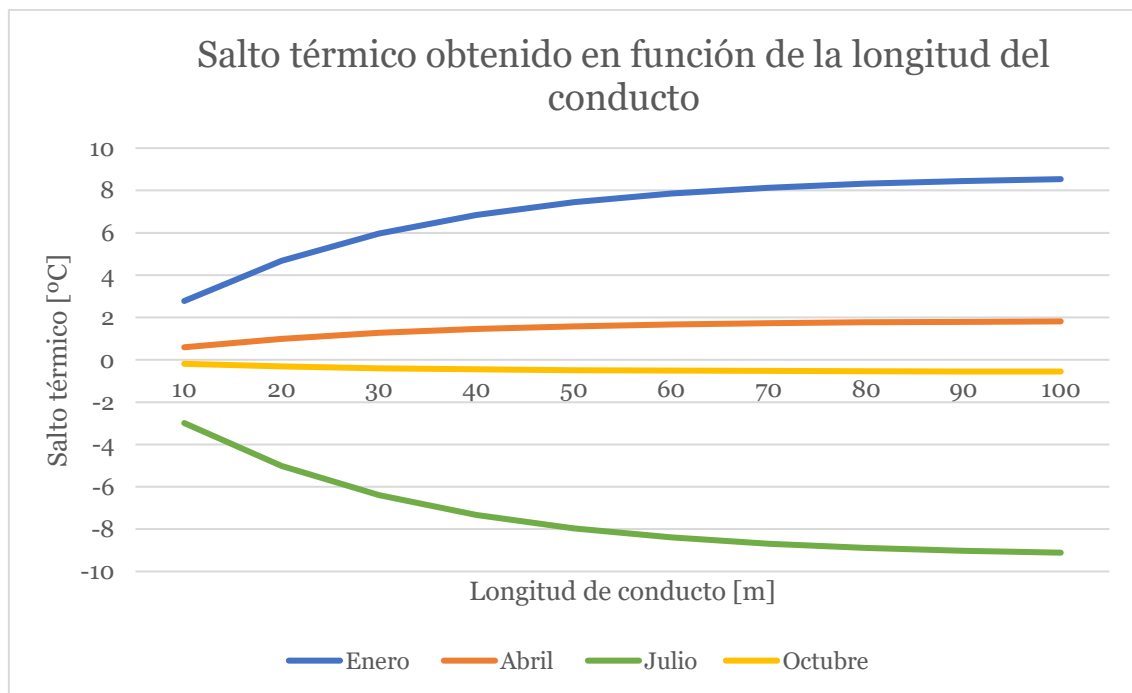
$n$  es el número de conductos de la instalación [-]

$\dot{V}_T$  es el caudal total [ $m^3/s$ ]

Para garantizar un buen intercambio de calor, la distancia adecuada entre los conductos es de aproximadamente un metro [34], de este modo se disminuye la interacción térmica entre ellos. Además, se deben construir con una pendiente de entre el 1 y el 2% para favorecer la evacuación de posible agua condensada hacia el pozo de drenaje.

### Longitud

Por último, se calcula la longitud de los conductos, lo cual determina el área de la superficie de intercambio térmico. Cuanto mayor sea esta área, mayor intercambio de calor se produce, pero este salto térmico está limitado por la temperatura del conducto, por ello el rango recomendado es entre 30 y 70 m, a partir de los 70 m se ha concluido que el cambio de temperatura no es significativo [33] [23]. Este fenómeno se puede observar en la siguiente gráfica donde a partir de los 70 m, el salto térmico se estabiliza. Además, queda representados los ‘periodos de transición’ que se dan al inicio de la primavera (abril) y del otoño (octubre) donde el salto térmico es mínimo debido a la casi nula diferencia entre la temperatura del aire de entrada y la del terreno.



Gráfica 4 Salto térmico obtenido en función de la longitud del conducto. Fuente: elaboración propia.

Este parámetro se ha estudiado en el análisis de las resistencias térmicas (anexo 8), las cuales son inversamente proporcionales a la longitud del conducto. Para todas ellas, a partir de los 50 m, el valor de la resistencia se estabiliza.

Junto con la longitud, el parámetro constructivo más influyente en el rendimiento del sistema es el diámetro. Mediante el análisis de las resistencias térmicas, se han estudiado el orden de magnitud de la resistencia del terreno considerando ambos y se ha llegado a la conclusión de que el diámetro, orden de magnitud  $10^{-1}$ , es más influyente que la longitud, orden de magnitud,  $10^{-2}$ .

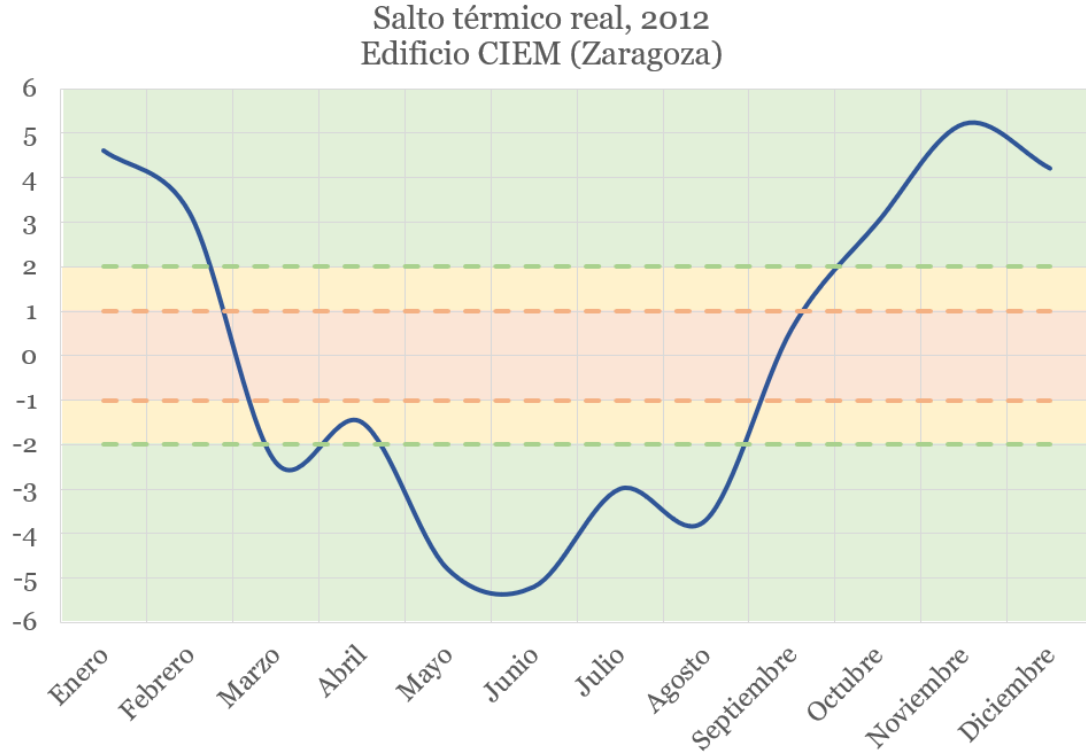
### Condiciones de operación

A continuación, se comentan algunas recomendaciones de las condiciones de operación de un intercambiador de calor tierra-aire. Cuando se modela el ICTA se supone que las condiciones del terreno no cambian, es decir, que actúa como foco. Esto no es cierto puesto que, durante los períodos de funcionamiento, el terreno adyacente a los conductos cambia de temperatura y puede suponer un aumento o disminución de ésta a largo plazo, es por ello que se recomienda el funcionamiento interrumpido frente al continuo, creando períodos de recuperación térmica del terreno [35]. En la siguiente gráfica, se puede observar este fenómeno, el cual ha sido monitorizado en el edificio CIEM (Zaragoza) y donde se aprecian las variaciones de temperatura debido a la construcción y utilización del intercambiador [19].



Gráfica 5 Temperatura del terreno con y sin intercambiador de calor tierra-aire. Fuente: Edificio CIEM [19].

Durante el transcurso del año, se observan ‘períodos de transición’, en los que el salto térmico obtenido es pequeño y no se observa ningún intercambio importante de calor puesto que el aire entrante del exterior es muy similar a la del subsuelo, por lo que las variaciones de temperatura no son significativas y su temperatura es adecuada para proporcionar las condiciones de confort térmico requeridas. Se puede observar en el siguiente gráfico, donde se han marcado las zonas donde el salto térmico no es significativo (zonas amarilla,  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , y naranja,  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ).



Gráfica 6 Salto térmico real obtenido en el edificio CIEM, año 2012. Fuente: elaboración propia en base a datos de la bibliografía [19] [36].

Por ello, se recomienda incluir un sistema auxiliar, como puede ser un sistema de compuertas, en el que se introduzca el aire al edificio sin necesidad de pasar por el intercambiador [37]. Como ejemplo, tras el estudio del salto térmico obtenido en el edificio CIEM en Zaragoza, se ha llegado a la conclusión de que el rendimiento de los pozos es aceptable cuando la temperatura exterior desciende por debajo de los 15°C para calefacción y cuando supera los 22°C para refrigeración [38]. A su vez está recomendado la incorporación de recuperadores de calor entre el aire que sale del intercambiador y el de expulsión para conseguir una eficiencia global mayor en el sistema.

### COP

EL COP del intercambiador tierra-aire se determina mediante la cantidad de potencia térmica producida y la cantidad de potencia eléctrica consumida para la circulación del aire:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{P}$$

Donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor intercambiado entre el aire y el terreno [W]

P es la potencia necesaria para la circulación del aire en los conductos [W]

El flujo de calor se calcula de la siguiente manera, sin considerar que ocurra variación de humedad:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot (T_{aire,salida} - T_{aire,entrada})$$

Donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor intercambiado con el aire [W]

$\dot{m}_{aire}$  es el caudal de aire que atraviesa el conducto [kg/s]

$c_{p,aire}$  es la capacidad térmica del aire [J/kg·K]

$T_{aire,salida}$  es la temperatura del aire a la salida del conducto [K]

$T_{aire,entrada}$  es la temperatura del aire a la entrada del conducto [K]

Tras estudiar los valores presentes en las instalaciones estudiadas, los cuales se han recopilado en el anexo 5, el valor de COP habitual es de entre 3,5 y 6. Sin embargo, los datos de COP recopilados son escasos puesto que en muchas de las instalaciones no se han compartido estos valores y no se han podido extraer conclusiones. Además, uno de los aspectos más importantes de estos intercambiadores es que el rendimiento a lo largo del año varía y tiene estaciones más productivas, por ello, lo correcto sería considerar el coeficiente de eficiencia estacional, SCOP, e indicar las condiciones en los que se ha cuantificado.

### 3.3.3. Mantenimiento y controles

El intercambiador de calor tiene dos riesgos frecuentes que son las partículas en el aire de entrada y la presencia de humedades derivadas de la presencia de agua condensada procedente del aire. Para asegurar que las condiciones del aire de impulsión son las adecuadas se instalan filtros tanto a la entrada como a la salida del intercambiador. Son habituales los filtros opacimétricos, los cuales retienen polen y polvo, se recomienda que su limpieza sea cada quince días [23], aunque dependerá de la polución presente en el aire dependiendo de la ubicación de la instalación. Es habitual la vigilancia de los filtros mediante la monitorización de la pérdida de carga, la cual aumenta proporcionalmente a la suciedad presente en el filtro.

El riesgo de condensación en el interior de los conductos, el cual depende de las condiciones climáticas, así como de la profundidad de enterramiento y la velocidad del aire, puede suponer crecimiento de moho y malos olores, por lo tanto, se deben lavar los conductos con una frecuencia aproximada de un año. La limpieza con soluciones desinfectantes con agua se podrá realizar únicamente si los conductos presentan una pendiente que permita su evacuación [23].

Además, se recomienda contar con un sistema de control de los datos del sistema, es decir, de temperatura de entrada y salida del aire, de humedad, y velocidad del aire, para controlar que las condiciones en las que trabaja el intercambiador son las mismas que las que se proyectaron cuando se diseñó (en la bibliografía, no se han encontrado datos al respecto).

### 3.3.4. Otras consideraciones

A continuación, se van a comentar otras configuraciones y líneas de investigación que se han estudiado en la bibliografía y que están en fase de desarrollo.

*Incorporación del conducto en la cimentación de edificios*

La empresa francesa Patrick CESCHIN SAS ha desarrollado una patente llamada Fondatherm [39], donde se incorpora el conducto del intercambiador de calor en el interior de los cimientos del edificio, con el fin de reducir la superficie necesaria para su instalación.

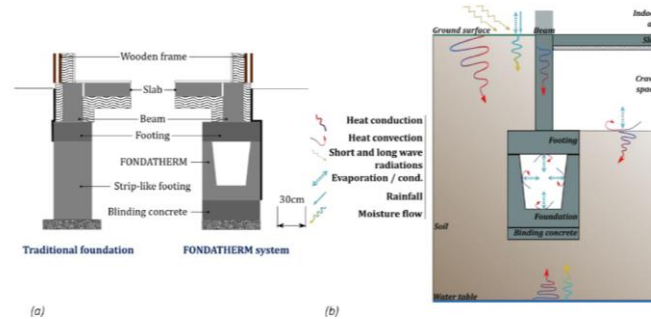


Figura 10 Comparación entre un cimiento tradicional y la tipología Fondatherm (a) y los fenómenos físicos involucrados. Fuente: *Energy and Buildings* [39].

La experimentación de esta tipología ha concluido que los flujos de calor y humedad que se han dado no son uniformes debido a su poca profundidad y a los flujos de calor que se trasladan desde el edificio hasta los cimientos. Además, se dan perfiles muy diferentes entre los periodos de enfriamiento y de calentamiento a lo largo de la longitud de los conductos, resultando en que la sección de salida del intercambiador solo cumple funciones de calentamiento, al contrario que la sección de entrada que enfría y calienta el aire. A pesar de ello, los valores de COP varían entre 1 y 7, que son valores habituales en los intercambiadores de calor de este tipo. Esta tecnología está en proceso de investigación y trabaja en el desarrollo de un modelo numérico que analiza su comportamiento.

#### *Materiales de cambio de fase*

La incorporación de materiales con cambio de fase en las paredes interiores del conducto está en proceso de investigación. En la instalación estudiada, se incorpora en la sección de salida del aire y se observa que la fluctuación en la temperatura de salida del intercambiador es menor que en ausencia de este material [40]. El comportamiento de este material depende mayoritariamente del espesor de la capa.

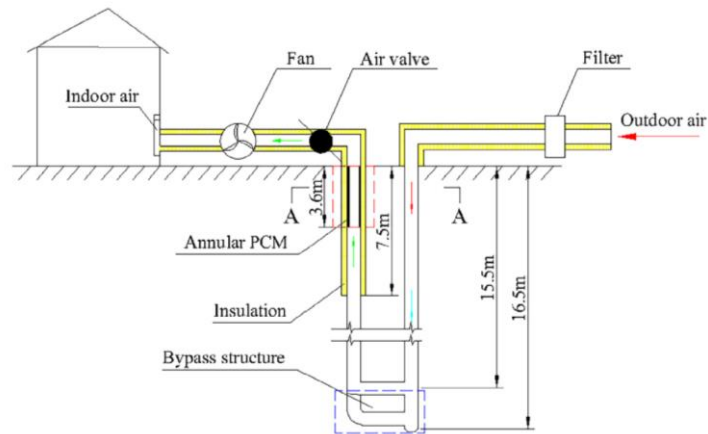


Figura 11 Esquema de una instalación con material con cambio de fase. Fuente: *Energy Conversion and Management* [40].

A continuación, se detallan las conclusiones que se han extraído del estudio de la inclusión del material de cambio de fase en el intercambiador de calor.

- Los materiales de cambio de fase son un sistema de almacenamiento de inercia térmica, al igual que el terreno, por lo tanto, se tendrían dos sistemas que aportan la misma función.
- La reducción de la fluctuación de temperatura (alrededor de un 30%) se da cuando la temperatura es alta, sin embargo, mayoría del tiempo, no se aprecia un cambio significativo en la variación de temperatura.
- El coste del PCM es alto, el beneficio derivado de la menor fluctuación de la temperatura se debería estudiar dependiendo de las características de cada una de las instalaciones, pero es cuestionable que sea beneficioso para la mayoría de ellas.
- La elección del espesor del PCM es difícil y no sigue una variación lineal, lo que podría suponer un esfuerzo alto en la elección de los parámetros, así como una mayor de probabilidad de error en los cálculos de diseño que provoquen un rendimiento menor del esperado.

Debido a todo ello, se ha llegado a la conclusión de que la inclusión de este tipo de materiales no supone una ventaja rentable para la instalación.

#### *Tipo de sección del conducto*

Hasta ahora, se ha hablado siempre de conductos con sección circular puesto que es la más habitual en este tipo de instalaciones. Se ha estudiado también instalaciones con secciones rectangulares y los resultados demuestran que, en comparación con los tubos de sección circular con la misma área de sección transversal, la variación de la temperatura de salida se reduce en un 24.7% y su desfase térmico es 22.67 días más largo [42]. A su vez, el rango de perturbación térmica del suelo circundante a los tubos es menor, que como consecuencia tiene un gradiente de temperatura más corto y hace que la temperatura del tubo sea más estable [42]. Pero tienen una desventaja respecto a la sección circular y es que la caída de presión y el consumo de energía del ventilador es mayor que la del ICTA de sección circular, y por lo tanto el valor del coeficiente



de rendimiento (COP) es menor, en concreto un 47% [42]. Se ha detallado en un apartado posterior las características de los valores de COP presentes en este tipo de instalaciones.

## 4. Software de prediseño

Una vez finalizado el estado del arte y con los conocimientos adquiridos durante su desarrollo, se han implementado todos los conceptos aprendidos en un software de prediseño de intercambiadores de calor tierra-aire. El objetivo ha sido desarrollar una herramienta para acercar de manera sencilla esta tecnología a los potenciales usuarios, por ello, se ha escogido una hoja Excel, al ser un programa altamente implantado en nuestras vidas, así como accesible para todo tipo de usuarios. El planteamiento de la hoja de cálculo ha sido la introducción de unos datos de entrada propios de la instalación (datos dimensionales, climáticos y del terreno) y la obtención de la temperatura de salida del aire, así como del salto térmico obtenido.

### 4.1. Desarrollo de la hoja de cálculo

El desarrollo del software se ha basado en una hoja Excel que cuenta con una hoja principal, donde el usuario realiza la totalidad de las interacciones, introduciendo unos datos de entrada, los cuales le devuelven los datos de salto térmico obtenido y la temperatura de salida del aire respecto a la profundidad y el mes del año. Además, consta de dos hojas más, donde están las constantes necesarias y los cálculos de los parámetros intermedios necesarios para obtener los resultados finales. El modelo de cálculo usado en este software es el desarrollado en la memoria de este trabajo y el cual está basado en el cálculo del coeficiente de transmisión térmica a partir de las resistencias térmicas del sistema, el método se puede encontrar en el apartado 3.3. de este trabajo y los cálculos de las resistencias térmicas en el anexo 8.

A continuación, se ha incluido un esquema de funcionamiento del software de prediseño donde se ilustran los distintos pasos a lo largo de los cálculos:

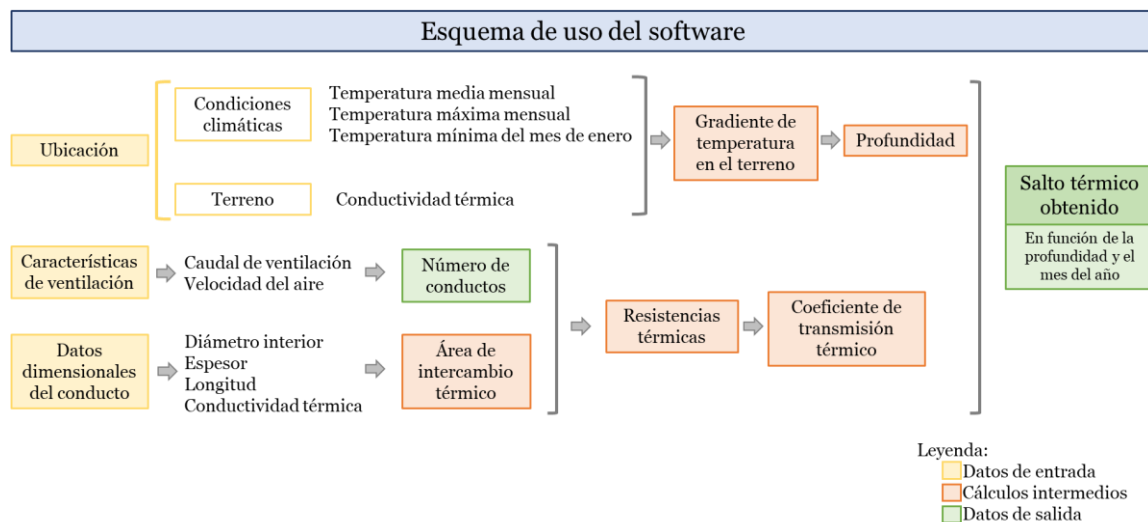


Figura 12 Esquema de uso del software de prediseño. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1. Hoja principal

Como se ha comentado anteriormente en la hoja principal del software de prediseño se deben introducir los datos de entrada, cuyas casillas están marcadas en amarillo, como se puede observar en la siguiente figura:

Datos relativos a la ubicación			Datos dimensionales de la instalación		
Terreno					
Conductividad térmica	1,5	W/m·K	Diámetro interior	0,3	m
Condiciones climáticas			Longitud	50	m
Temp. media anual	15,51	°C	Espesor	0,005	m
	Temp. media mensual [°C]	Temp. máxima mensual [°C]	Número de conductos	20	---
Enero	6,60	10,50	Area de intercambio térmico de un conducto	47,12	m <sup>2</sup>
Febrero	8,20	13,1	Caudal de ventilación	10000	m <sup>3</sup> /h
Marzo	11,60	17,3	total	2,78	m <sup>3</sup> /s
Abril	13,80	19,6	Kconducto	0,93	W/m·K
Mayo	18,00	24,1	Velocidad aire conducto	0,01	m/s
Junio	22,60	29,3	Velocidad aire total	0,20	m/s
Julio	25,30	32,4			
Agosto	25,00	31,7			
Septiembre	21,20	27,1			
Octubre	16,20	21,4			
Noviembre	10,60	14,8			
Diciembre	7,00	10,8			
Temp. mínima del mes de enero	2,7	°C			

Figura 13 Tablas de datos de entrada del software de prediseño. Fuente: elaboración propia.

Una vez introducidos los datos de entrada, la hoja Excel devuelve los valores de salto térmico obtenido en función de la profundidad y del mes del año, como se puede observar en la siguiente figura:

		Salto térmico [°C] (Taire, salida - Taire, entrada)											
	Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad [m]	1	0,47	-1,75	-3,59	-5,00	-3,06	-2,60	-1,41	0,29	2,53	3,98	4,51	3,46
	2	3,45	1,49	-0,79	-2,00	-2,77	-3,36	-2,83	-1,30	1,28	3,62	5,26	5,39
	3	4,86	3,33	1,08	-0,04	-2,08	-3,38	-3,46	-2,32	0,18	2,83	5,05	5,95
	4	5,43	4,35	2,33	1,27	-1,25	-2,97	-3,52	-2,80	-0,57	2,09	4,54	5,89
	5	5,54	4,83	3,09	2,07	-0,49	-2,41	-3,27	-2,90	-0,96	1,55	4,02	5,58
	6	5,43	4,99	3,50	2,52	0,11	-1,86	-2,88	-2,76	-1,09	1,23	3,61	5,23
	7	5,24	4,98	3,69	2,73	0,54	-1,40	-2,49	-2,51	-1,04	1,09	3,34	4,94
	8	5,06	4,90	3,75	2,82	0,83	-1,05	-2,13	-2,24	-0,91	1,07	3,19	4,73
	9	4,92	4,81	3,75	2,83	1,01	-0,79	-1,84	-1,98	-0,75	1,12	3,13	4,59
	10	4,82	4,74	3,73	2,83	1,12	-0,61	-1,62	-1,77	-0,59	1,20	3,12	4,52

Figura 14 Tabla de datos del salto térmico obtenido en el software de prediseño. Fuente: elaboración propia.

La tabla indica mediante el relleno de color de las celdas si existe calentamiento o enfriamiento. En el caso de que el salto térmico sea positivo, es decir, si se produce calentamiento del aire, las celdas son rojas; en el caso contrario, donde el salto térmico es negativo, se ilustra el enfriamiento del aire mediante el marcado azul.

También se obtiene la temperatura del aire de salida, como se puede ver en la siguiente tabla:

		Temperatura del aire de salida [°C]											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad [m]	1	6,01	5,88	7,85	10,24	14,52	19,29	22,70	23,64	21,54	17,68	12,67	8,45
	2	7,83	7,77	9,36	10,89	14,26	18,27	21,22	22,10	20,33	17,17	13,00	9,61
	3	8,73	8,93	10,48	11,65	14,52	18,00	20,51	21,15	19,37	16,48	12,77	9,94
	4	9,09	9,57	11,25	12,33	14,96	18,12	20,29	20,64	18,72	15,85	12,35	9,85
	5	9,13	9,86	11,71	12,84	15,40	18,40	20,34	20,46	18,34	15,40	11,93	9,60
	6	9,03	9,93	11,96	13,17	15,76	18,71	20,52	20,46	18,17	15,11	11,60	9,33
	7	8,87	9,89	12,05	13,36	16,01	18,97	20,73	20,57	18,14	14,96	11,38	9,09
	8	8,72	9,81	12,05	13,45	16,17	19,17	20,92	20,70	18,19	14,90	11,24	8,92
	9	8,60	9,72	12,02	13,47	16,26	19,30	21,07	20,84	18,26	14,91	11,17	8,80
	10	8,52	9,64	11,98	13,47	16,30	19,39	21,19	20,95	18,34	14,94	11,15	8,74

Figura 15 Tabla de datos de la temperatura de salida obtenida en el software de prediseño. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se ha incorporado el valor de las resistencias térmicas del sistema en la hoja principal con la finalidad de que el usuario conozca los valores, así como el porcentaje de influencia de cada una mediante una escala de colores, como se puede observar en la figura siguiente:

Resistencias térmicas	K/W	%
Terreno	8,70E-03	98,2%
Conducto	1,12E-04	1,3%
Aire	4,73E-05	0,5%

Figura 16 Ejemplo de la tabla de la influencia de las resistencias térmicas en el software. Fuente: elaboración propia.

Esta tabla además tiene como objetivo que el usuario conozca la influencia de los diferentes parámetros de entrada en el resultado final y como la variabilidad de las variables de entrada provoca diferentes resultados.

#### 4.1.2. Hojas de cálculos

Las hojas de cálculos albergan todos los parámetros intermedios antes de obtener el salto térmico, así como los datos necesarios para su obtención. Esta hoja tiene tres cálculos principales:

- Resistencias térmicas y coeficiente global de transmisión térmica.
- Temperaturas del terreno a distintas profundidades.
- Temperatura del aire de salida dependiendo de la profundidad.

Todas estas variables se calculan mediante el método de transmisión de calor mediante resistencias térmicas, explicado tanto en el apartado 3.3. de la memoria, así como en el anexo 8.

#### 4.1.3. Hipótesis simplificadoras

Se han considerado diversas hipótesis con el objetivo de simplificar el cálculo y análisis de este software. A continuación, se enumeran todas ellas.

- Se ha simplificado el cálculo del intercambio de calor al considerar únicamente el aporte de calor sensible, despreciando el calor latente. En determinadas condiciones, existe intercambio por calor latente debido a la condensación de la humedad presente en el

aire. Sin embargo, depende de las condiciones del aire exterior, así como de la estación del año, lo que provoca que sea una contribución temporal y muy condicionada a elementos externos a la instalación, por ello, se ha despreciado su aportación. Además, al no considerar este aporte, en el caso de que sí se produzca, los resultados del ICTA serán más favorables.

- Se ha asumido que la temperatura de la pared interior del conducto es igual a la del terreno. La temperatura en la pared del conducto se debería calcular como la media ponderada entre la temperatura del terreno sin influencia del conducto y la temperatura del aire en el interior del conducto, teniendo en cuenta el coeficiente de transmisión de calor [19]. A efectos prácticos, se ha despreciado esa diferencia y se ha asumido que ambas temperaturas son iguales [25].
- Para el cálculo de la temperatura del terreno a distintas profundidades es necesario el valor de la temperatura media anual del terreno a una profundidad donde no son perceptibles las variaciones de temperatura y se debe considerar el valor dependiendo de la ubicación. En el caso de España, entre los 10-15 metros de profundidad, el valor de esta temperatura es aproximadamente 12,5°C. Se ha asumido este valor para todos los cálculos a pesar de que, dependiendo de la ubicación y las condiciones del terreno, este valor podría variar. Debido a ello, se ha dejado la posibilidad de que este dato sea introducido por el usuario, en el caso de que se conozca un valor más exacto.
- El número de conductos de la instalación es introducido en el software por el usuario, dependiendo de este valor, es posible que en la práctica no todos ellos estén a la misma profundidad debido a la limitación de superficie y, por lo tanto, los valores de la temperatura de salida del aire no sean idénticos. Esta posibilidad no se contempla debido a que el salto térmico se deja en función de la profundidad y sirve como un primer análisis de los resultados.

## 4.2. Validación del software

### 4.2.1. Datos de entrada de la simulación

Para la validación de esta hoja de cálculo se han considerado los datos de resultados del edificio CIEM (Zaragoza) [19] [45], tanto de la temperatura de salida del aire como del salto térmico obtenido, los cuáles se pueden ver en la siguiente tabla.

*Tabla 9 Datos reales del intercambiador de calor del edificio CIEM (año 2012). Fuente: elaboración propia en base a datos de la bibliografía [36].*

<b>Datos de temperatura edificio CIEM (año 2012)</b>						
<i>Temperatura de entrada del aire</i>			<i>Temperatura de salida del aire</i>			<i>Salto térmico [°C]</i>
Tmedia [°C]	Tmínima [°C]	Tmáxima [°C]	Tmedia [°C]	Tmínima [°C]	Tmáxima [°C]	
7,7	1,1	15,4	<b>12,3</b>	10,6	14,0	4,6
6,8	-2,3	18,5	<b>10,0</b>	8,8	11,8	3,2
13,9	4,7	26,0	<b>11,5</b>	10,1	13,9	-2,4
14,9	6,2	27,8	<b>13,4</b>	12,2	14,9	-1,5
21,6	12,0	36,0	<b>16,8</b>	13,1	20,4	-4,8
26,5	15,2	40,0	<b>21,3</b>	19,6	24,3	-5,2
26,0	15,2	40,1	<b>23,0</b>	21,6	25,1	-3,0
28,9	16,7	42,2	<b>25,2</b>	22,6	28,1	-3,7
22,4	13,8	33,9	<b>23,0</b>	21,1	24,6	0,6
16,8	4,5	28,9	<b>19,8</b>	14,7	22,1	3,0
11,1	5,0	19,7	<b>16,3</b>	12,0	18,0	5,2
8,6	0,4	16,4	<b>12,8</b>	10,9	13,5	4,2

Se ha simulado el intercambiador tierra-aire de la instalación teniendo en cuenta los siguientes parámetros dimensionales [19]:

*Tabla 10 Datos dimensionales de la instalación CIEM. Fuente: elaboración propia basado en datos de la bibliografía [45] [19] [15].*

<b>Datos dimensionales de la instalación</b>		
Diámetro interior	0,3	m
Longitud	50	m
Espesor	0,05	m
Número de conductos	18	---
Caudal de ventilación total	10.000	m <sup>3</sup> /h
$\lambda_{\text{conducto}}$	0,93	W/m·K

Para el valor de la conductividad térmica del terreno se ha considerado el valor de terreno húmedo (1,5 W/m·K) [15], valor por defecto del software, al no disponer de datos reales.

Los datos de temperatura de entrada del aire considerados fueron los correspondientes al año 2012 [19], año en los que se obtuvieron los resultados de la instalación considerados en este análisis:

*Tabla 11 Datos de la temperatura de entrada real del aire en la instalación CIEM. Fuente: elaboración propia basado en datos de la bibliografía [45] [19].*

Temperatura de entrada del aire [°C] (2012)			
Mes	Temp. Media [°C]	Temp. Mínima [°C]	Temp. máxima[°C]
Enero	7,7	1,1	15,4
Febrero	6,8	-2,3	18,5
Marzo	13,9	4,7	26,0
Abril	14,9	6,2	27,8
Mayo	21,6	12,0	36,0
Junio	26,5	15,2	40,0
Julio	26,0	15,2	40,1
Agosto	28,9	16,7	42,2
Septiembre	22,4	13,8	33,9
Octubre	16,8	4,5	28,9
Noviembre	11,1	5,0	19,7
Diciembre	8,6	0,4	16,4

#### 4.2.2. Resultados de simulación

Los resultados obtenidos en el software de prediseño, tanto de temperatura de salida como de salto térmico, son los siguientes:

*Tabla 12 Datos de la temperatura de salida del ICTA simulado. Fuente: elaboración propia.*

		Taire, salida [°C]											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad [m]	1	5,29	3,34	7,40	9,60	16,08	21,94	24,37	27,55	23,96	19,31	13,46	8,93
	2	12,68	6,04	9,66	10,56	15,78	20,49	22,06	25,32	22,14	18,54	13,99	10,76
	3	14,21	7,68	11,31	11,65	16,17	20,10	20,95	23,93	20,72	17,54	13,69	11,31
	4	14,88	8,60	12,44	12,62	16,82	20,27	20,56	23,19	19,75	16,65	13,12	11,24
	5	<b>15,07</b>	<b>9,01</b>	<b>13,13</b>	<b>13,35</b>	<b>17,46</b>	<b>20,66</b>	<b>20,59</b>	<b>22,92</b>	<b>19,19</b>	<b>15,99</b>	<b>12,54</b>	<b>10,93</b>
	6	15,01	9,12	13,49	13,82	17,98	21,09	20,80	22,92	18,93	15,57	12,08	10,57
	7	14,87	9,07	13,64	14,09	18,35	21,46	21,07	23,05	18,87	15,35	11,77	10,27
	8	14,72	8,95	13,67	14,22	18,58	21,74	21,31	23,24	18,92	15,27	11,59	10,04
	9	14,60	8,83	13,63	14,26	18,71	21,93	21,51	23,42	19,02	15,27	11,50	9,90
	10	14,53	8,72	13,58	14,25	18,78	22,05	21,65	23,57	19,12	15,31	11,47	9,82

Tabla 13 Datos de salto térmico obtenido del ICTA simulado. Fuente: elaboración propia.

		Salto térmico [°C] (Taire, salida - Taire, entrada)											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Profundidad [m]	1	-2,41	-3,46	-6,50	-5,30	-5,52	-4,56	-1,63	-1,35	1,56	2,51	2,36	0,33
	2	4,98	-0,76	-4,24	-4,34	-5,82	-6,01	-3,94	-3,58	-0,26	1,74	2,89	2,16
	3	6,51	0,88	-2,59	-3,25	-5,43	-6,40	-5,05	-4,97	-1,68	0,74	2,59	2,71
	4	7,18	1,80	-1,46	-2,28	-4,78	-6,23	-5,44	-5,71	-2,65	-0,15	2,02	2,64
	5	<b>7,37</b>	<b>2,21</b>	<b>-0,77</b>	<b>-1,55</b>	<b>-4,14</b>	<b>-5,84</b>	<b>-5,41</b>	<b>-5,98</b>	<b>-3,21</b>	<b>-0,81</b>	<b>1,44</b>	<b>2,33</b>
	6	7,31	2,32	-0,41	-1,08	-3,62	-5,41	-5,20	-5,98	-3,47	-1,23	0,98	1,97
	7	7,17	2,27	-0,26	-0,81	-3,25	-5,04	-4,93	-5,85	-3,53	-1,45	0,67	1,67
	8	7,02	2,15	-0,23	-0,68	-3,02	-4,76	-4,69	-5,66	-3,48	-1,53	0,49	1,44
	9	6,90	2,03	-0,27	-0,64	-2,89	-4,57	-4,49	-5,48	-3,38	-1,53	0,40	1,30
	10	6,83	1,92	-0,32	-0,65	-2,82	-4,45	-4,35	-5,33	-3,28	-1,49	0,37	1,22

Se han marcado en negrita las temperaturas obtenidas a una profundidad de 5 metros debido a que la instalación del edificio CIEM consta de dos filas de conductos a unas profundidades de 4 m y 6 m, por ello, se ha considerado para el análisis de los resultados la profundidad media entre ellas.

En la siguiente tabla se ha realizado una comparación de entre los datos de simulación y los datos reales de la instalación.

Tabla 14 Comparación de resultados entre los datos de simulación y los datos reales. Fuente: elaboración propia.

Comparación de resultados						
Mes	Tsalida				Salto térmico	
	Treal [°C]	Tsimulada [°C]	Tsim-Treal [°C]	%	$\Delta T_{real}$ [°C]	$\Delta T_{simulada}$ [°C]
Enero	12,3	10,05	-2,25	-18,3%	4,6	2,35
Febrero	10,0	9,01	-0,99	-9,9%	3,2	2,21
Marzo	11,5	13,13	1,63	14,2%	-2,4	-0,77
Abril	13,4	13,35	-0,05	-0,4%	-1,5	-1,55
Mayo	16,8	17,46	0,66	4,0%	-4,8	-4,14
Junio	21,3	20,66	-0,64	-3,0%	-5,2	-5,84
Julio	23,0	20,59	-2,41	-10,5%	-3,0	-5,41
Agosto	25,2	22,92	-2,28	-9,1%	-3,7	-5,98
Septiembre	23,0	19,19	-3,81	-16,6%	0,6	-3,21
Octubre	19,8	15,99	-3,81	-19,3%	3,0	-0,81
Noviembre	16,3	12,54	-3,76	-23,1%	5,2	1,44
Diciembre	12,8	10,93	-1,87	-14,6%	4,2	2,33

La tabla anterior consta de dos partes diferenciadas, el análisis de la temperatura de salida, donde se ha calculado la diferencia entre la temperatura simulada y la temperatura real (se ha considerado la temperatura media del aire de salida), así como el porcentaje de desviación, y una comparativa entre el salto obtenido en la simulación y el real. A continuación, se va a realizar un análisis de ambas partes.

#### Análisis de la temperatura de salida

Como se puede observar en la tabla anterior, se ha resaltado la diferencia de temperatura dependiendo del valor. Los valores negativos pueden ser debidos al aporte del calor latente, el cual no se tiene en cuenta en los cálculos del software. Este aporte se aprecia considerablemente en los meses de otoño (septiembre a noviembre), cuando la humedad del aire es superior al resto del año.

En el mes de marzo se observa que el valor de simulación es superior al real, al contrario que el resto de los meses, una posible razón es cambios en el régimen de ventilación puesto que la

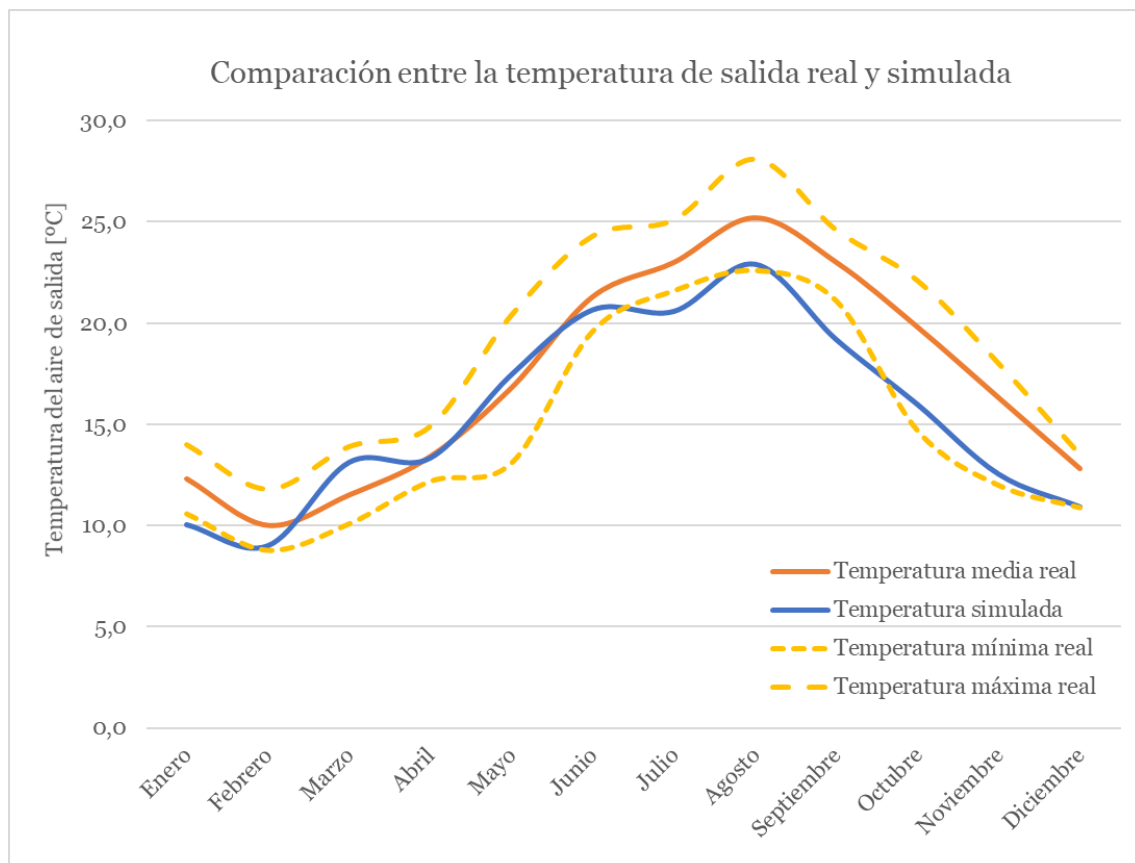


instalación del edificio CIEM tiene un rango de caudal de ventilación entre 5.480 y 15.500 m<sup>3</sup>/h (a menor caudal, menor velocidad del aire en los conductos y, por lo tanto, peor transferencia de calor). Un cambio en la humedad del terreno es otra posible opción, lo cual provoca una conductividad menor del terreno.

Además, se ha calculado la variación porcentual, los meses de abril a junio son en los que se ha conseguido una mejor aproximación de la temperatura de salida. En los meses en los que se ha obtenido un peor ajuste de la temperatura de salida, la variación ha oscilado entre un 10 y un 20%, siendo los meses de octubre y noviembre en los que se ha obtenido un peor resultado (19,3% y 23,1%, respectivamente).

Los resultados globales de la temperatura de salida del aire muestran una diferencia media de 1,63°C por debajo de la temperatura real, siendo la variación media un 8,9% por debajo del valor real.

En la siguiente grafica se han ilustrado los valores reales de temperatura de salida de la instalación (valor medio, mínimo y máximo a lo largo del año) y el resultado obtenido en la simulación. Se observa que la curva de la temperatura simulada se ajusta de manera aproximada al rango de valores de la temperatura real, obteniendo un peor resultado en los meses de julio y septiembre.

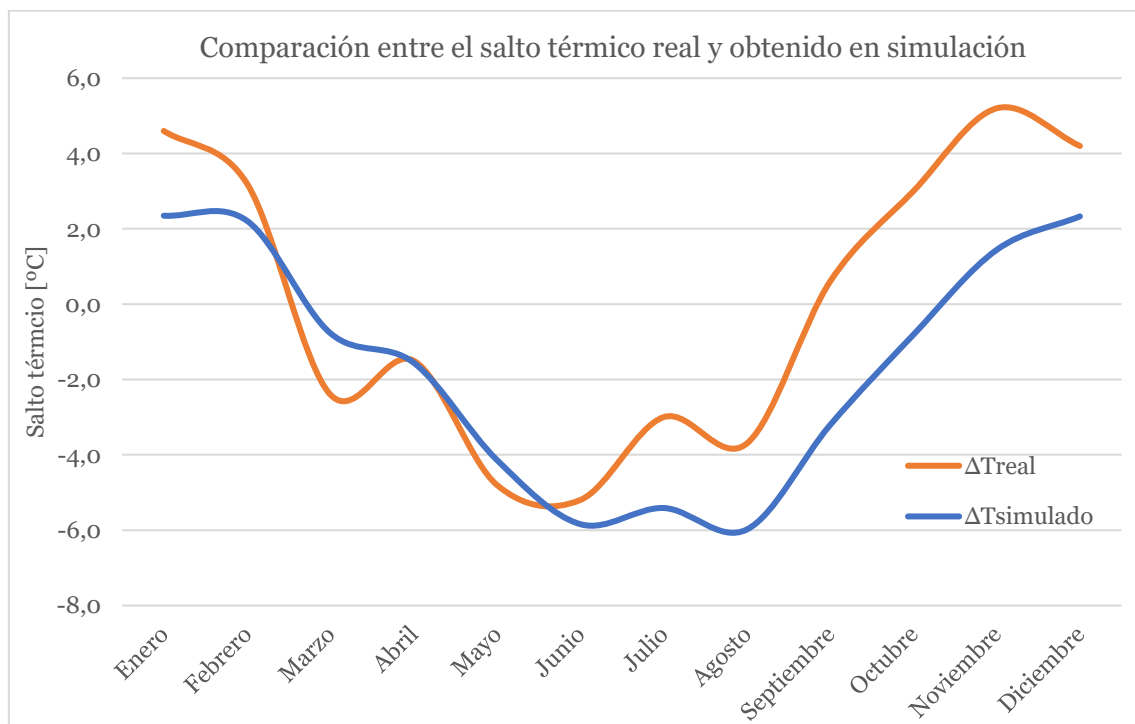


Gráfica 7 Comparativa entre la temperatura del aire de salida simulada y real. Fuente: elaboración propia.

### *Análisis del salto térmico*

Las últimas dos columnas de la tabla son los saltos térmicos obtenidos con la hoja de cálculo y los datos reales. Los resultados globales son similares a los obtenidos para la temperatura de salida. Cabe destacar que, en los meses de otoño (septiembre y octubre), al no considerar el calor latente, el salto térmico obtenido indica que ocurre enfriamiento en vez de calentamiento. En los meses de invierno (noviembre a febrero), la variación de entre el salto térmico real y el simulado es de aproximadamente 2°C por debajo. Para los meses de verano (mayo a septiembre), la variación es del orden de 1°C.

La comparación entre el valor real y simulado se ilustra en la siguiente gráfica, donde se aprecia que, en los meses de invierno, debido a la posible aportación del calor latente, el cual no se cuantifica en el software, la aproximación de la curva del salto térmico simulado está alrededor de 2°C por debajo del valor real.



*Gráfica 8 Comparativa entre el salto térmico simulado y real. Fuente: elaboración propia.*

### *Conclusión*

Considerando las hipótesis de simplificación, especialmente la hipótesis de no considerar el aporte de calor latente, y que se trata de una hoja de cálculo para realizar una primera aproximación de este tipo de intercambiadores, se acepta esta variación entre los resultados simulados y reales. Adicionalmente, cabe destacar que la conductividad térmica del terreno adoptada para la realización de este análisis se ha supuesto, al no conocerse el dato real.

Para continuar con el estudio existen programas donde se pueden hacer análisis más exhaustivos, como puede ser los siguientes:

- EES: para consideración del aporte del calor latente.

- TRNSYS: este software tiene un type que modeliza este tipo de intercambiadores.
- EnergyPlus: como el anterior, este programa es capaz de modelizar los ICTA.

El primer programa, EES, se puede considerar en la fase de diseño, pero tanto TRNSYS como EnergyPlus están indicados para el análisis de resultados posterior al diseño de los intercambiadores.

### 4.3. Análisis de sensibilidad

Se ha realizado un análisis de la sensibilidad de los distintos parámetros del intercambiador de calor tierra-aire, el método utilizado ha sido la variación de cada parámetro y su comparación con los datos de temperatura de salida y salto térmico obtenidos en la instalación del edificio CIEM, descritos en el apartado anterior 'Validación de la hoja de cálculo'.

Este análisis consta de dos partes:

- Análisis de las incertidumbres asociadas a los parámetros de la instalación, ya sean debidas a variaciones en las dimensiones debidas a la ejecución de obra, tolerancias dimensionales o mala estimación del valor.
- Estudio del salto térmico obtenido en función de la temperatura de entrada del aire.

#### 4.3.1. Análisis de incertidumbres

En este apartado se ha estudiado la incertidumbre asociada a los distintos parámetros dimensionales de la instalación, debidas ya sea a la ejecución de obra o las tolerancias de producción. En todos los parámetros se ha asumido una incertidumbre del valor del  $\pm 10\%$ .

Se ha escogido como instalación de estudio el intercambiador de calor del edificio CIEM, la cual ha sido usada anteriormente en el apartado de validación de la hoja de cálculo. Para ello, se han estudiado los siguientes parámetros: diámetro, longitud y conductividad térmica del terreno y se han mantenido el resto de parámetro constantes. La totalidad de los datos de la instalación del CIEM se encuentran recogidos en la tabla del anexo 5, los datos que aplican a este apartado se recogen en la siguiente tabla:

*Tabla 15 Datos de la instalación del edificio CIEM utilizados en el análisis de sensibilidad. Fuente: elaboración propia en base a datos de la bibliografía [45] [19].*

Diámetro	0,3 m
Longitud	50 m
Conductividad térmica del terreno	1,5 W/m·K

En el caso de la conductividad térmica, se ha tomado un valor medio de conductividad térmica del terreno al no conocer el valor presente en esta instalación, este valor es el mismo que se ha utilizado en el análisis de resistencias térmicas de las instalaciones de la bibliografía.

No se han estudiado los parámetros asociados al conducto, espesor y conductividad térmica del conducto, debido a que, como se ha concluido en el análisis de las resistencias térmicas, se puede considerar despreciable.

#### *Conductividad térmica del terreno*

Un aumento en la conductividad del terreno provoca una disminución directamente proporcional de la resistencia térmica del terreno, esta aportación es importante porque esta resistencia, como se ha visto en el análisis de resistencias, es la dominante del sistema en la

mayoría de las instalaciones. Esta disminución de la resistencia favorece la transferencia de calor y provoca una temperatura de salida más favorable y un mayor salto térmico entre la temperatura de entrada y salida del pozo.

Para el estudio de cómo afecta la conductividad del terreno en el resultado final, además de estudiar el caso de la instalación CIEM, se han recreado tres casos considerando ambos extremos también con el objetivo de estudiar si en alguno de los casos esta incertidumbre tiene una mayor influencia en el resultado final:

- Caso 1: se ha considerado un valor medio de conductividad térmica, este valor es el mismo que se ha utilizado en el cálculo de la resistencia del terreno de las instalaciones de la bibliografía, recopiladas en el anexo 5.
- Caso 2: corresponde a un suelo seco y ligero, con una capacidad de transferencia de calor muy baja. Este es el valor mínimo de conductividad térmica encontrado en la bibliografía [28].
- Caso 3: con este valor de conductividad se ha considerado un terreno húmedo, este valor es el máximo de conductividad térmica encontrado en la bibliografía [28].

*Tabla 16 Conductividades térmicas del terreno usadas en los casos de estudio. Fuente: elaboración propia en base a datos de la bibliografía [15] [28].*

Caso	$\lambda_{\text{terreno}} [\text{W/m}\cdot\text{K}]$
1	1,5
2	0,35
3	2,4

Se ha simulado una variación del  $\pm 10\%$  de la conductividad térmica de los tres casos anteriormente descritos con el objetivo de conocer cómo afecta esta incertidumbre dependiendo del terreno presente.

Se ha calculado el salto térmico de los meses de Enero, Abril, Julio y Octubre, con el objetivo de conocer la influencia de este parámetro a lo largo del año. Los resultados obtenidos son los siguientes:

*Tabla 17 Resultados de la simulación del salto térmico de los tres casos. Fuente: elaboración propia.*

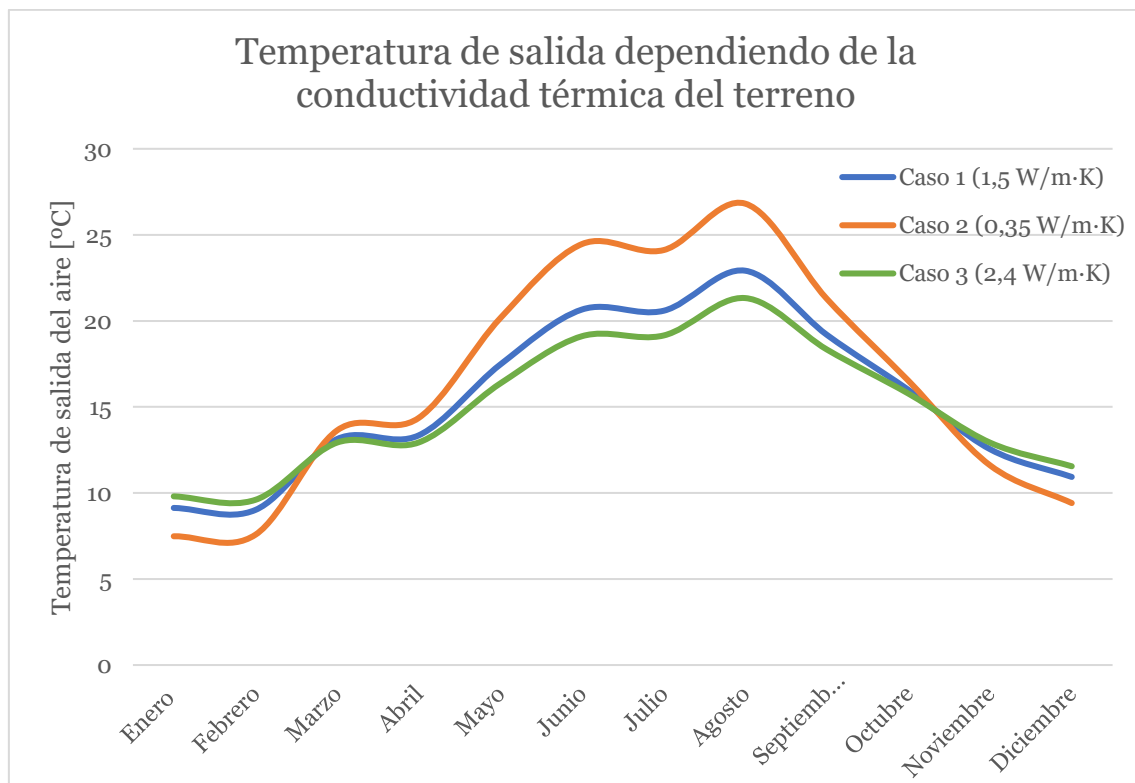
	$\lambda_{\text{terreno}} [\text{W/m}\cdot\text{K}]$	$R_{\text{terreno}} [\text{K/W}]$	Enero			Abril			Julio			Octubre		
			$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	Variación $[^{\circ}\text{C}]$	Variación [%]	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	Variación $[^{\circ}\text{C}]$	Variación [%]	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	Variación $[^{\circ}\text{C}]$	Variación [%]	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	Variación $[^{\circ}\text{C}]$	Variación [%]
Caso 1	1,35	0,01	2,38	-0,15	-5,9%	-0,90	0,06	-5,9%	-4,67	0,29	-5,9%	-1,05	0,07	-5,9%
	1,5	0,01	2,53			-0,96			-4,96			-1,12		
	1,65	0,01	2,67	0,14	5,4%	-1,01	-0,05	5,4%	-5,22	-0,27	5,4%	-1,18	-0,06	5,4%
Caso 2	0,315	0,04	0,81	-0,08	-8,7%	-0,31	0,03	-8,7%	-1,58	0,15	-8,7%	-0,36	0,03	-8,7%
	0,35	0,04	0,88			-0,33			-1,73			-0,39		
	0,385	0,03	0,96	0,07	8,4%	-0,36	-0,03	8,4%	-1,87	-0,15	8,4%	-0,42	-0,03	8,4%
Caso 3	2,16	0,01	3,05	-0,15	-4,7%	-1,16	0,06	-4,7%	-5,98	0,29	-4,7%	-1,35	0,07	-4,7%
	2,4	0,01	3,20			-1,21			-6,27			-1,42		
	2,64	0,01	3,34	0,13	4,2%	-1,26	-0,05	4,2%	-6,53	-0,26	4,2%	-1,48	-0,06	4,2%

Como se puede observar, cuánto menor es la conductividad térmica, mayor es la variación del salto térmico obtenido asociado a la misma incertidumbre. El error obtenido es del orden de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , lo que implica la siguiente variación en cada uno de los casos:

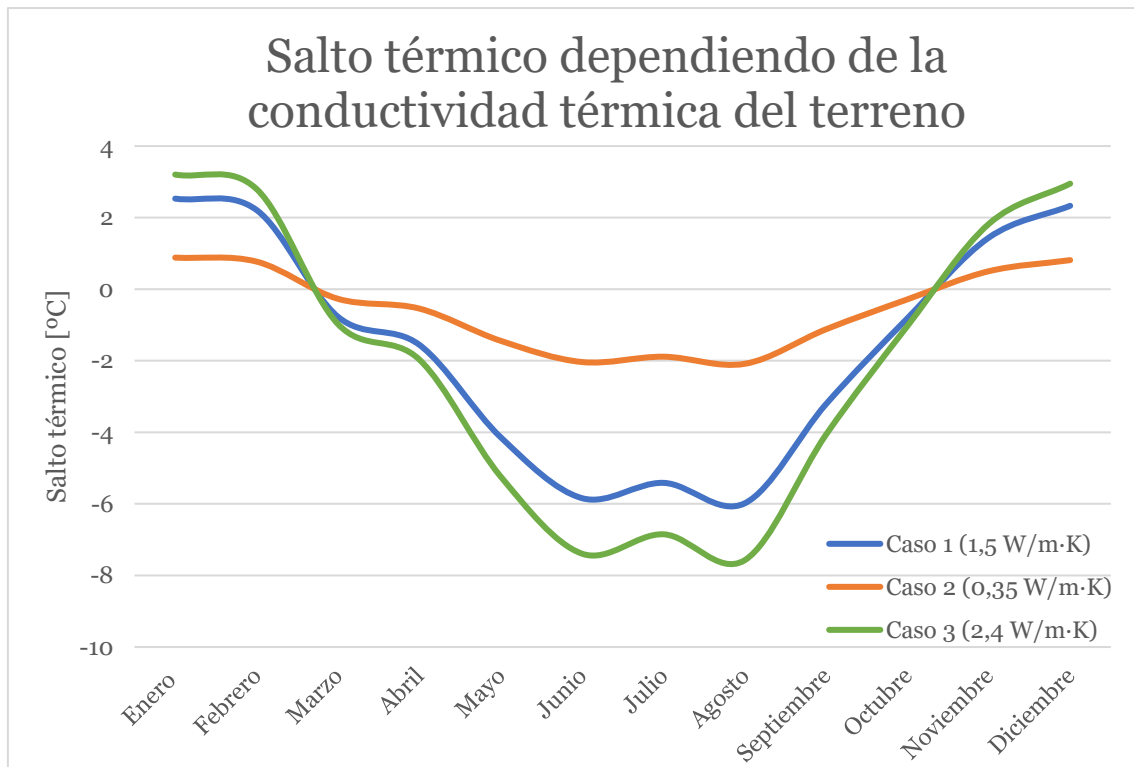
Tabla 18 Porcentaje de variación del salto térmico debido a la incertidumbre asociada a la conductividad térmica del terreno. Fuente: elaboración propia.

Caso	Variación
1	5-6%
2	8-9%
3	4-5%

A continuación, se ilustran tanto la temperatura de salida como el salto térmico en los tres casos considerados. La variación que provoca el cambio de valor de la conductividad térmica se hace más evidente en los meses de verano. En el caso 2, el valor de salto térmico es del orden de 3°C inferior al caso 1, mientras que, en los meses de invierno, este valor es alrededor de 1°C más bajo. En el caso 3, ocurre el mismo efecto, aunque en menor medida, en verano los valores de salto térmico son 1°C superior mientras que, en invierno, son alrededor de 0,5°C.

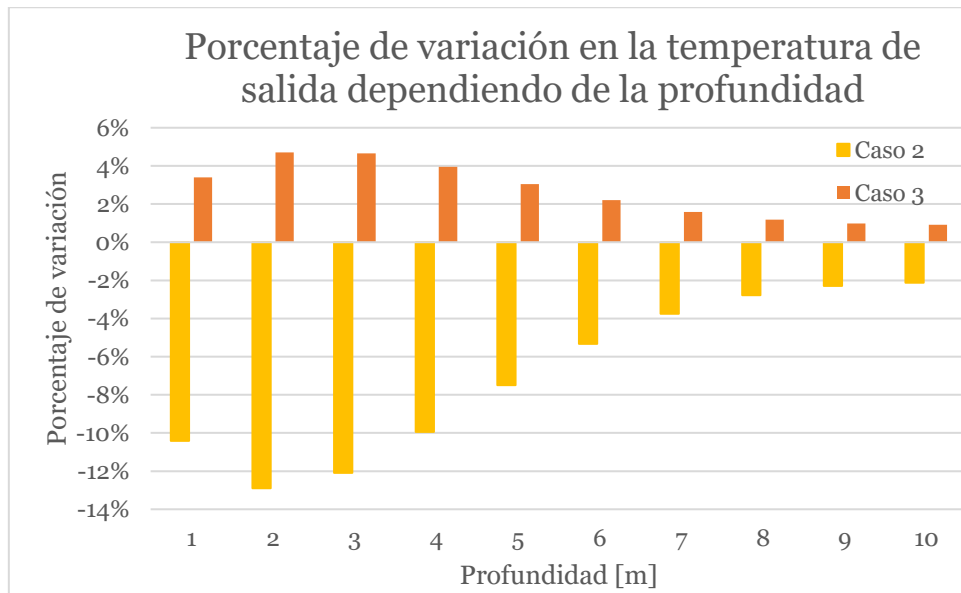


Gráfica 9 Temperatura de salida dependiendo de la conductividad térmica del terreno. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 10 Salto térmico dependiendo de la conductividad térmica del terreno. Fuente: elaboración propia.

La siguiente gráfica ilustra la influencia de cada conductividad dependiendo de la profundidad, se han calculado los porcentajes de variación del salto térmico de los casos respecto al caso 1. Cuanto menor es la profundidad, mayor diferencia se observa en la variación de la temperatura de salida, especialmente a una profundidad de 2-3 m.



Gráfica 11 Salto térmico y porcentajes de los tres casos considerados. Fuente: elaboración propia.

## Diámetro

La incertidumbre del diámetro está asociada a la variación de diámetro interior debido a las tolerancias de producción. Un error en el diámetro afecta a las tres resistencias del terreno, provocando una variación en el coeficiente global de transmisión de calor, así como en la superficie de intercambio térmico.

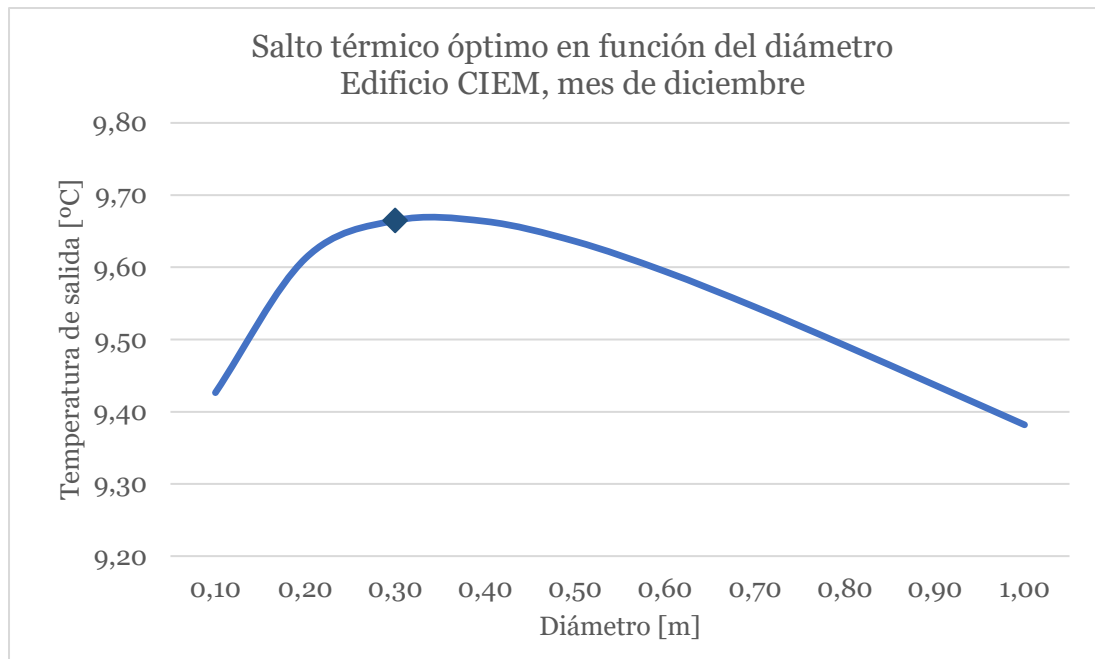
Se ha simulado una tolerancia del  $\pm 10\%$  respecto del diámetro de la instalación estudiada (0,3 m), para la que se ha obtenido una variación del orden de  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  en el salto térmico, provocando una variación alrededor del 0,5%.

Se ha realizado un estudio complementario relacionado con el valor de diámetro que maximiza el salto térmico obtenido. En la siguiente tabla se han recopilado los datos obtenidos y la variación porcentual entre ese valor y el de la instalación del edificio CIEM (el cual está remarcado en amarillo). Además, se ha ilustrado la variación de la temperatura de salida, tanto en invierno como en verano, y se ha marcado el valor de la instalación, como se puede observar, este valor es el que maximiza el rendimiento del ICTA.

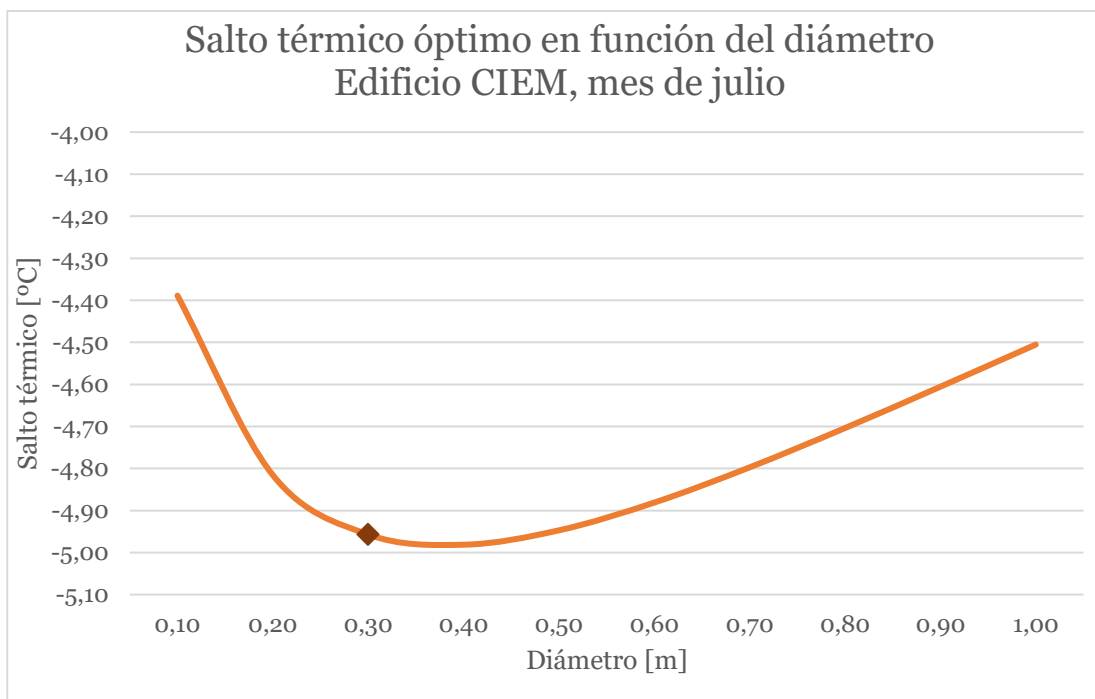
Tabla 19 Datos y porcentaje de variación dependiendo del diámetro. Fuente: elaboración propia.

Diámetro [m]	Tsalida [ $^\circ\text{C}$ ]		Salto térmico [ $^\circ\text{C}$ ]	
0,10	9,43	-2,5%	2,43	-8,9%
0,20	9,61	-0,5%	2,61	-2,0%
0,30	9,66	0,0%	2,66	0,0%
0,40	9,66	0,0%	2,66	0,0%
0,50	9,64	-0,3%	2,64	-1,1%
0,60	9,59	-0,7%	2,59	-2,6%
0,70	9,55	-1,2%	2,55	-4,5%
0,80	9,49	-1,8%	2,49	-6,5%
0,90	9,44	-2,4%	2,44	-8,5%
1,00	9,38	-2,9%	2,38	-10,6%



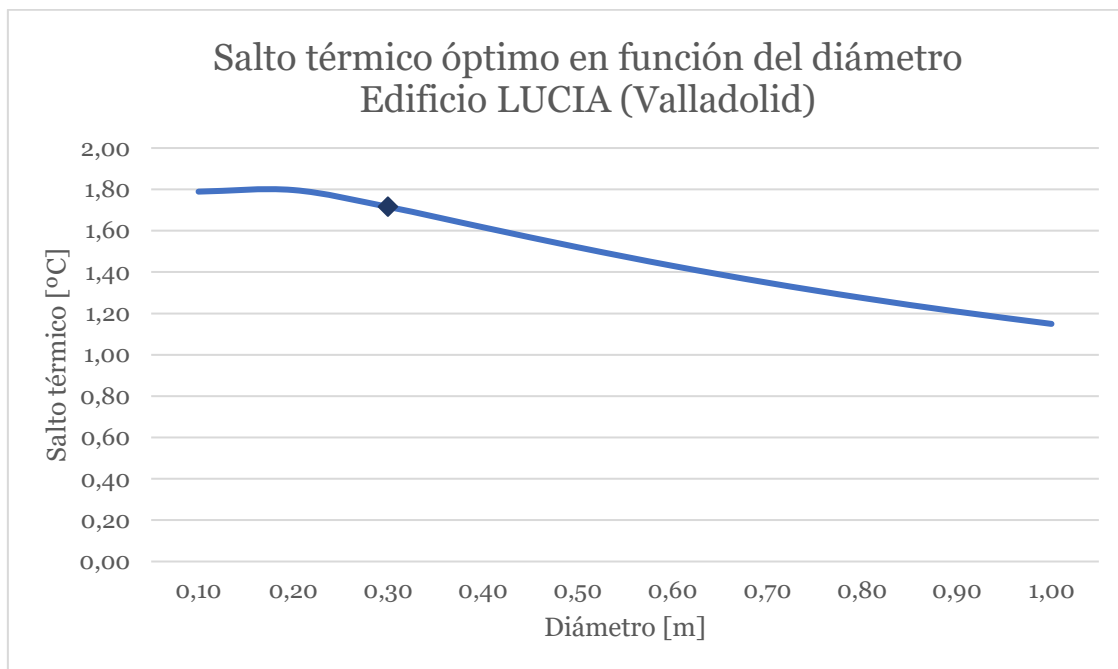


Gráfica 12 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro (mes de diciembre) del edificio CIEM. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 13 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro (mes de julio) del edificio CIEM. Fuente: elaboración propia.

Se ha comprobado si en otras instalaciones ocurre el mismo comportamiento respecto al diámetro que en el edificio CIEM. El caso de estudio ha sido el ICTA del edificio LUCIA (Valladolid), cuyo diámetro es 0,27 m, como se puede observar en la siguiente gráfica, en este caso el diámetro que maximiza el salto térmico obtenido es 0,2 m. En este caso, el rango donde se obtiene el mejor resultado es de 0,1 m a 0,4m, disminuyendo linealmente a partir de ese valor.



Gráfica 14 Temperatura de salida del aire dependiendo del diámetro del edificio LUCIA (Valladolid).  
Fuente: elaboración propia.

En el caso del edificio LUCIA, se ha analizado también la influencia de una posible incertidumbre en el diámetro del conducto, en este caso para la misma incertidumbre de  $\pm 10\%$ , la variación en el salto térmico obtenido es de  $0,02^{\circ}\text{C}$ , alrededor del  $1,3\%$ .

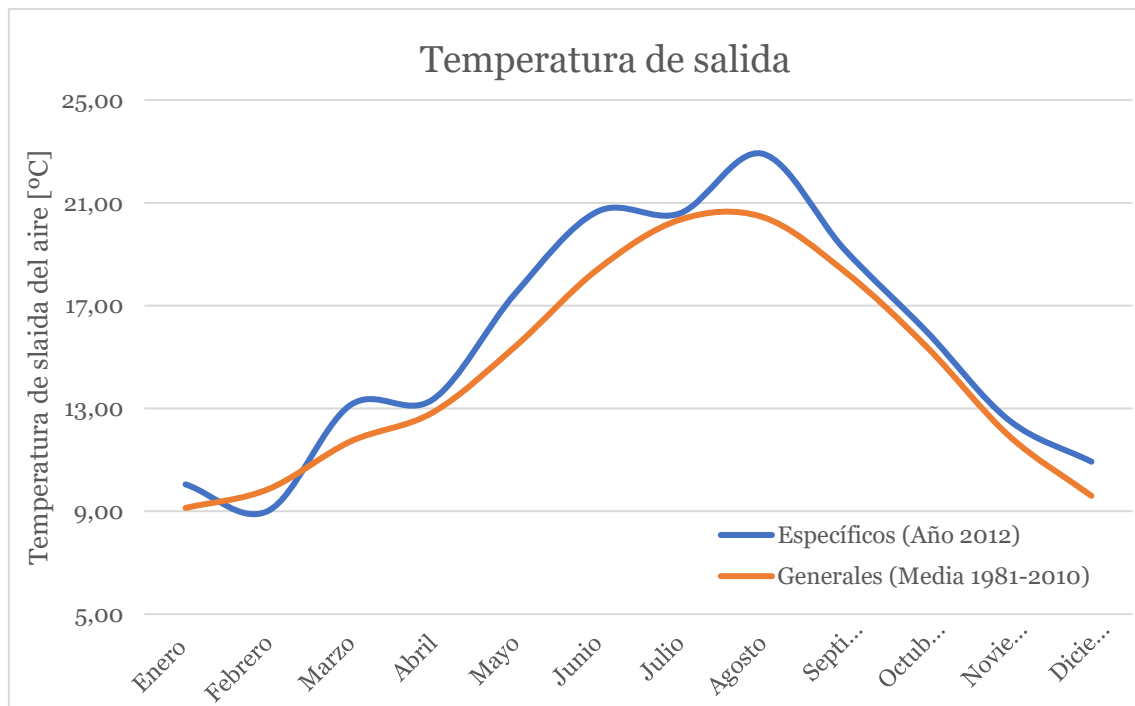
Se puede concluir que las variaciones en el salto térmico no son muy acusadas dependiendo del diámetro y que es altamente dependiente de la instalación concreta que se estudia. Además, es claro que, en las instalaciones estudiadas, hay un diámetro que maximiza el rendimiento del sistema.

#### Longitud

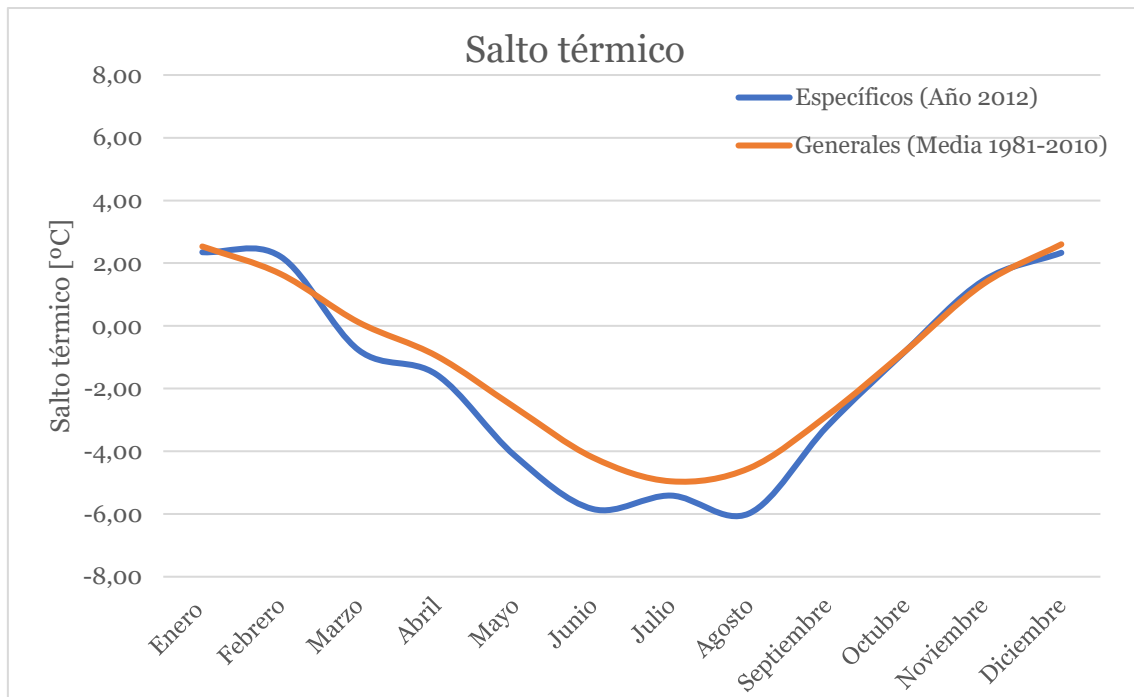
Este parámetro lleva asociada incertidumbre debido a la ejecución de obra, ya sea por una mala realización o falta tanto de espacio disponible como de material. La longitud de la instalación del CIEM es 50 m, se ha simulado una tolerancia de  $\pm 10\%$  y se ha obtenido una variación del orden de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  en el salto térmico, lo que provoca un cambio de alrededor del  $8\%$ . La longitud de los conductos afecta a las tres resistencias térmicas, un aumento en este parámetro disminuye de manera proporcional las resistencias, aumentando el coeficiente global de transmisión de calor y provocando un mayor salto térmico.

#### 4.3.2. Estudio del salto térmico obtenido en función de la temperatura de entrada del aire

Se ha realizado una comparación entre las temperaturas del año 2012 respecto a los datos de la página de AEMET, las cuales son las medias de las obtenidas desde 1981 hasta 2010. Con ello se ha ilustrado las posibles diferencias que puede encontrar el usuario al utilizar datos generales públicos y la variabilidad de las características de años particulares.



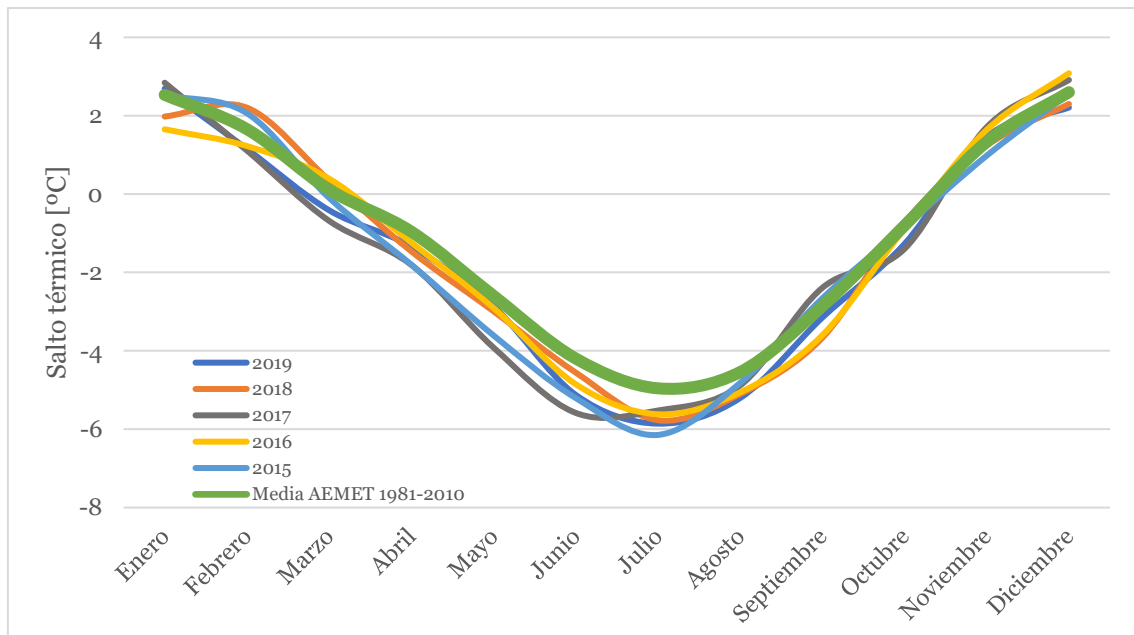
Gráfica 15 Comparación de la temperatura de salida obtenida entre datos específicos de temperatura (año 2012) y datos generales (media AEMET, período 1981-2010). Fuente: elaboración propia.



Gráfica 16 Comparación del salto térmico obtenido entre datos específicos de temperatura (año 2012) y datos generales (media AEMET, período 1981-2010). Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en ambas gráficas, los datos obtenidos en AEMET, los cuales son una recopilación desde 1981 hasta 2010, ofrecen una gráfica más suavizada y uniforme, mientras que el resultado de un año concreto ofrece las singularidades de ese año. Se tienen que tener en cuenta ambas perspectivas cuando se simula la instalación. El orden de magnitud del error asociado a ello es de 1°C.

Se ha continuado estudiando el salto térmico obtenido en distintos años, en concreto en el período 2015-2019 [46] respecto a los datos de AEMET [26] (línea verde de la gráfica), se ha obtenido la siguiente gráfica donde se puede observar que la variación es del orden de 1°C, siendo más pronunciada los meses centrales del año (mayo-agosto).

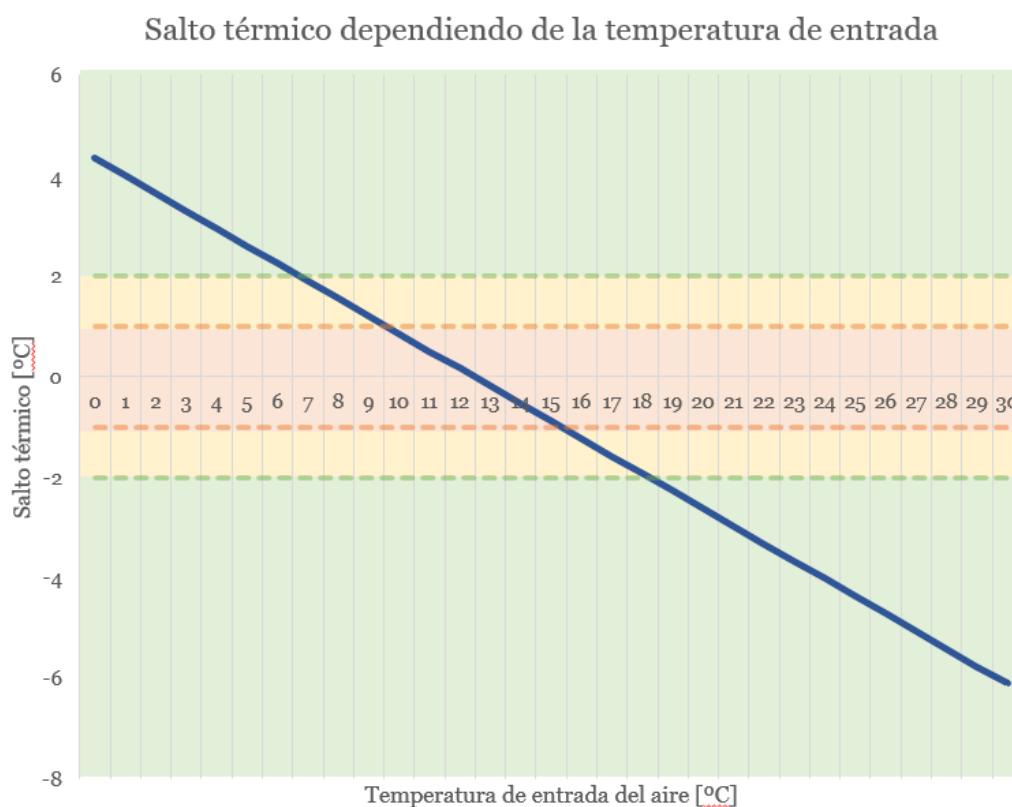


Gráfica 17 Comparación de salto térmico obtenido de los años 2015 al 2019 frente a la media de AEMET (período 1981-2010). Fuente: elaboración propia.

Se ha simulado el salto térmico obtenido dependiendo de la temperatura de entrada, se ha estudiado un rango de 0°C a 30°C. Para ello se ha escogido la instalación del CIEM, es necesario destacar que este estudio es específico de esta instalación. Para este análisis, debido a que la temperatura del terreno varía a lo largo del año, se ha procedido a usar la media de estas temperaturas a una profundidad de 5 m, siendo este valor 12,48°C.

A continuación, se ha ilustrado una gráfica en donde se han marcado las siguientes partes diferenciadas de salto térmico:

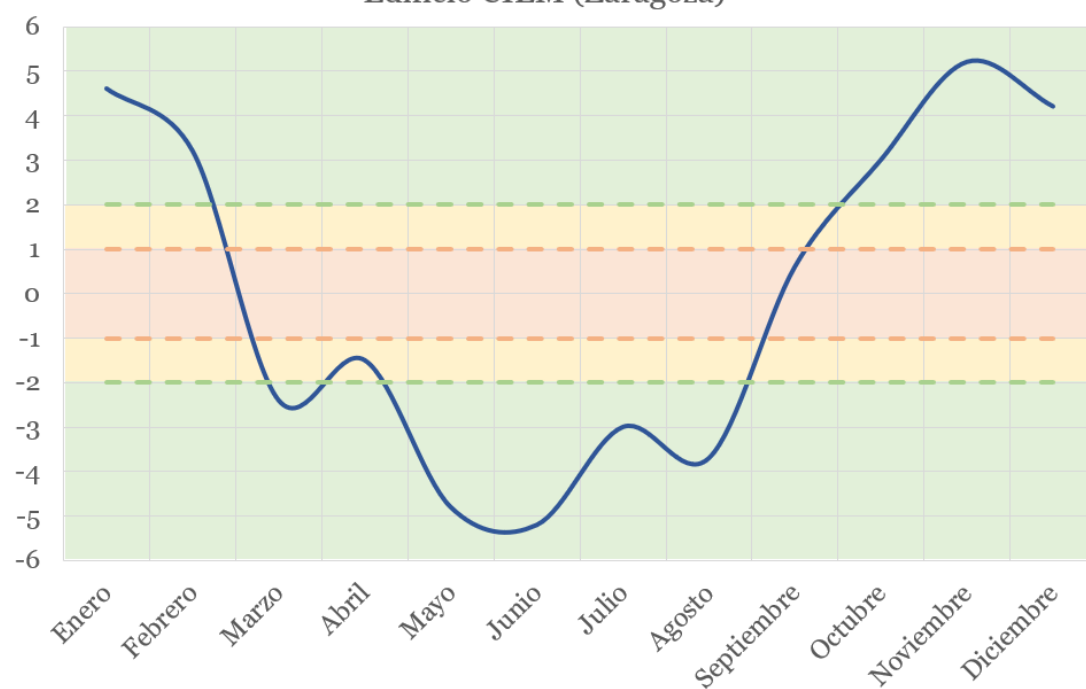
- Zona naranja: valores de salto térmico por debajo 1°C, este resultado se obtiene cuando la temperatura de entrada se encuentra entre los 9°C y los 15°C.
- Zona amarilla: para valores de temperatura de entrada entre 7°C y 18°C, se consiguen saltos térmicos por debajo de los 2°C.
- Zona verde: para los rangos de temperatura fuera de los valores comentados anteriormente, se obtiene valores de salto térmico por encima de los 2°C.



*Gráfica 18 Salto térmico obtenido respecto a la temperatura de entrada del aire, Edificio CIEM. Fuente: elaboración propia.*

De la misma manera, se ha estudiado el COP en función de la temperatura de entrada como se puede observar en la siguiente gráfica. En la gráfica se ilustran los ‘períodos de transición’ en los meses de primavera y otoño, donde los saltos térmicos obtenidos son pequeños. Cabe destacar que este dato de salto es un valor medio mensual y que se deberá estudiar la posibilidad de hacer un bypass en la instalación.

### Salto térmico real, 2012 Edificio CIEM (Zaragoza)



Gráfica 19 Salto térmico real obtenido en la instalación del Edificio CIEM (año 2012). Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.3. Conclusiones del análisis de sensibilidad

Las conclusiones extraídas de este análisis son las siguientes:

- Los órdenes de magnitud de variación de salto térmico obtenido respecto a una incertidumbre del 10% son los siguientes:
  - Conductividad térmica del terreno:  $0,1^{\circ}\text{C}$ .
  - Diámetro:  $0,01^{\circ}\text{C}$
  - Longitud:  $0,4^{\circ}\text{C}$
- El parámetro con un menor error asociado a su incertidumbre es el diámetro, sin embargo, existe un rango de diámetro óptimo propio de cada instalación que maximiza el resultado de salto térmico.
- El parámetro dimensional que mayor error asociado tiene es la longitud, en el caso estudiado la variación del salto térmico es de aproximadamente el 8%.
- Respecto a la conductividad del terreno, a valores más pequeños, el error asociado a la incertidumbre crece.
- El estudio del COP respecto a la temperatura de entrada es en el estudio de viabilidad de este tipo de instalación, conocer los rangos de temperatura en los que el salto térmico obtenido sea favorable, así como los períodos de transición en los que el ICTA no es capaz de lograr un aporte térmico adecuado.



## 5. Conclusiones

Las conclusiones extraídas del presente trabajo de fin de grado se han dividido en dos bloques, las obtenidas durante la elaboración del estado del arte y las relativas al desarrollo del software de prediseño.

El estado del arte se ha basado en la consulta de 105 fuentes bibliográficas (estudios, trabajos, artículos, normativa, tesis, ...). Mediante el análisis y tratamiento de esta información se han recopilado los datos dimensionales y de funcionamiento de 32 instalaciones, 6 de ellas presentes en el territorio nacional y siendo 29 de ellas experimentales. Adicionalmente, se ha estudiado el contexto energético actual y la normativa aplicable a los intercambiadores de calor tierra-aire.

El estado del arte se ha basado tanto en el análisis de la bibliografía descrita anteriormente como en el estudio de los mecanismos de transferencia de calor y el análisis de las resistencias térmicas del sistema. A continuación, se enumeran las conclusiones extraídas:

- 1.1. Esta tecnología está presente mayoritariamente en edificios de gran capacidad y residenciales, 53,6% y 28,6% de las instalaciones recopiladas, respectivamente. El 63% de las instalaciones se encuentran en climas templados lluviosos, se recomienda que las condiciones climatológicas de la ubicación presenten grandes variaciones de temperatura entre estaciones y entre el día y la noche, con el objetivo de que la inercia térmica del terreno genere un mayor desfase temporal entre la temperatura del terreno y la temperatura del exterior.
- 1.2. Se han obtenido las resistencias térmicas de las instalaciones en las que se tenían datos para ello, de las cuales se han calculado 12 resistencias de convección interior forzada del aire que circula por el conducto, 4 resistencias de conducción a través de la pared del conducto y 21 resistencias de conducción a través del terreno. La falta de datos de los conductos pone de manifiesto la poca importancia que se ha dado en la bibliografía a su influencia en el resultado final.
- 1.3. El orden de magnitud de la resistencia del terreno es  $0,1 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ , la cual disminuye con la adición de materiales que aumenten la conductividad térmica del terreno. El estudio de los parámetros dimensionales que influyen en el valor de esta resistencia ha concluido que tanto el diámetro como la longitud tienen una influencia similar (orden de magnitud de la variación de  $0,01 \text{ K}/\text{W}$ ). Además, la resistencia es directamente proporcional a la profundidad de enterramiento.
- 1.4. La resistencia térmica del conducto es del orden de  $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ .
- 1.5. El orden de magnitud de las resistencias térmicas del aire varía entre  $0,01$  y  $0,1 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ . El cálculo del número de Reynolds presente en las distintas instalaciones ha indicado que en el 85% de los casos el flujo presente es turbulento, donde la velocidad se encuentra entre 1 y 3 m/s. Esta conclusión corresponde con lo encontrado en la bibliografía.
- 1.6. El análisis de la resistencia total del sistema y la influencia de cada una de ellas en el resultado global ha corroborado que la resistencia térmica del conducto es despreciable.

En el 85% de los casos la resistencia dominante es la del terreno, lo cual depende estrechamente del régimen del aire presente en la instalación, cuanto mayor es el número de Reynolds, menor es la resistencia de convección del aire, disminuyendo el peso de ésta en la resistencia térmica total. El análisis del aporte de las resistencias de las instalaciones se puede observar en la gráfica 37 (anexo 8).

- 1.7. El análisis del COP presente en las instalaciones ha puesto en evidencia la falta de datos de este parámetro y, especialmente, la necesidad de conocer las condiciones en los que se ha medido con el objetivo de conocer el rendimiento del sistema a lo largo del año y ser capaces de analizar los periodos de transición. El rango de valor más habitual de COP de las instalaciones de la bibliografía es entre 3 y 6.

El segundo bloque del presente trabajo ha consistido en el desarrollo del software de prediseño de la instalación, las conclusiones extraídas son las siguientes:

- 2.1. La temperatura de salida del aire simulada es aproximadamente 1,5°C menor que la temperatura real y el salto térmico simulado es entre un 1°C y un 2°C menor que el real. Esto se debe a que no ha sido considerado el aporte de calor latente en los cálculos, a pesar de ello, los valores obtenidos se consideran adecuados al estar dentro del rango de datos reales, con un peor ajuste en los meses de invierno. Por tanto, se considera validada la herramienta planteada. Esta herramienta, tal y como se había planteado en los objetivos, puede servir para cálculos aproximados de prediseño en futuras instalaciones. Los resultados de la temperatura de salida pueden observarse en la gráfica 7 (capítulo 4, apartado 4.2.), los relativos al salto térmico están representado en la gráfica 8 (capítulo 4, apartado 4.2.).
- 2.2. El análisis del error asociado a una incertidumbre del 10% de variación de los parámetros de entrada ha demostrado que los parámetros que generan una mayor influencia en el resultado del salto térmico y, por lo tanto, un mayor error son la conductividad térmica del terreno y la longitud, ambos tienen un orden de magnitud de 0,1°C, frente al diámetro, el cual posee un orden de magnitud de 0,01°C.
- 2.3. Se obtiene un mayor error en los resultados, tanto de temperatura de salida del aire como de salto térmico, conforme más pequeño es el valor de la conductividad térmica del terreno.
- 2.4. El error asociado a la mala estimación de la conductividad térmica del terreno puede suponer variaciones del salto térmico en torno a 3°C. Este error tiene una mayor influencia en el caso de que la profundidad de enterramiento sea entre 2 a 3 m (gráfica 11, capítulo 4, apartado 4.3.).
- 2.5. El estudio del valor de salto térmico entre la temperatura de entrada del aire y de salida obtenido dependiendo de la temperatura de entrada del aire ha evidenciado la necesidad de conocer los periodos de transición en los que el salto de temperaturas para el aire entre la entrada y la salida obtenido no es significativo y cuantificar cuanto tiempo a lo largo del año ocurre este fenómeno. En el caso de la instalación estudiada, si la temperatura de entrada se encuentra entre 7 y 18°C, el salto térmico obtenido es

menor de 2°C. La representación de este estudio se encuentra en la gráfica 18 (capítulo 4, apartado 4.3.)

- 2.6. Las instalaciones tienen un rango de diámetro en el que el salto térmico para el aire entre entrada y salida se maximiza, en el caso de las instalaciones estudiadas este rango es de 0,2 a 0,4 m. Este estudio se encuentra representado en la gráficas 12 a 14 (capítulo 4, apartado 4.3.).

A nivel personal, el desarrollo de este trabajo ha supuesto un gran aprendizaje y la oportunidad de combinar todos los conocimientos aprendidos a lo largo del grado en un proyecto como este, desde el tratamiento de grandes volúmenes de datos y su posterior análisis hasta el desarrollo de una hoja de cálculo en la que sintetizar todo lo aprendido a lo largo de estos meses.

Por último, se han descrito posibles líneas de futuro con las que continuar el trabajo desarrollado:

- Estudio y desarrollo de una hoja de cálculo en la que se considere el aporte del calor latente.
- El estudio y análisis del COP y sus condiciones de medición en distintas instalaciones con el objetivo de obtener una metodología con la que conocer el COP en función tanto de la temperatura de entrada del aire como del salto térmico obtenido.
- La oportunidad de trabajar en el intercambiador de calor tierra -aire del edificio de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza monitorizando la instalación y estudiando el rendimiento de los distintos pozos.



## Referencias

- [1] Comisión Europea, «Un marco estratégico en materia de clima y energía para el período 2020-2030,» Comisión Europea, Bruselas , 2014.
- [2] Parlamento Europeo y del Consejo, «Directiva 2018/2002/CE,» 2 de Diciembre de 2018.
- [3] BP plc, «Statistical Review of World Energy 2019,» 2020.
- [4] Comisión Europea, «Comisión Europea,» 17 Febrero 2020. [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es). [Último acceso: Agosto 2020].
- [5] Eurostat, E. y. T. Ministerio de Industria y IDAE, «Consumos del Sector Residencial en España,» 2018.
- [6] Eurostat, «Energy consumption and use by households,» 2019.
- [7] IDAE, «Consumos del Sector Residencial en España,» 2018.
- [8] Ministerio de Sanidad; Gobierno de España, «Recomendaciones de Operación y Mantenimiento de los Sistemas de Climatización y Ventilación de Edificios y Locales para la Prevención del SARS-Cov-2,» Madrid, España , 2020.
- [9] ATECYR, «Documento guía REHVA COVID-19 del 3 de Agosto de 2020,» 2020.
- [10] Comisión Europea , «European Commission: Climate strategies and targets,» 2018 . [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [11] Boletín Oficial del Estado, «Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo,» 2010.
- [12] G. d. España, «Código Técnico de la Edificación,» 2006.
- [13] Gobierno de España, «Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE,» Madrid, España , 2007.
- [14] G. d. España, «Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.,» 2021.
- [15] AENOR, «Norma UNE-EN 16798-5-1:2018. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 5-1: Métodos de cálculo de las demandas energéticas de los sistemas de ventilación y de acondicionamiento de aire.,» 2018.
- [16] L. V. Roldán, *El movimiento del aire condicionante de diseño arquitectónico*, Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, 2006.
- [17] Acciona, «Sede de ACCIONA SOLAR: primer edificio 'cero emisiones' de España,» 2009.

- [18] G. B. C. Javier, C. Monne Bailo, M. Iturbe Sánchez y E. García Aparicio, «CIEM. Primer edificio de consumo casi nulo de titularidad municipal en Zaragoza. Estrategia de ejecución y funcionamiento.,» *CONTART 2018: VII Convención de la Edificación*, pp. 320-330, 2018.
- [19] C. J. García Ballano, C. Monné Bailo, M. Sánchez Iturbe y E. García Aparicio, «Análisis de un intercambiador tierra-aire (EAXH) atendiendo al comportamiento cíclico estacional de las temperaturas del terreno que envuelve a los tubos,» *CONTART 2018: VII CONvención de la Edificación* , vol. 29, pp. 289-298, 2018.
- [20] F. V. García, «Edificio LUCIA: Arquitectura sostenible y consumo nulo de energía,» 2010.
- [21] R. L. Arquitectos, «Ruiz Larrea Arquitectos,» [En línea]. Available: Ruiz Larrea Arquitectos . [Último acceso: Septiembre 2020].
- [22] A. Amann, «Centro cultural Daoiz y Velarde,» 2014.
- [23] J. Escuer, «Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.geoconsultores.org/index.php?modo=recursos>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [24] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Prentice Hall , 1999.
- [25] IDAE y ATECYR, «Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.,» 2012.
- [26] AEMET, «Valores climatológicos normales. Zaragoza Aeropuerto.,» [En línea]. Available: <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=9434&k=arn>. [Último acceso: Enero 2021].
- [27] D. Pahud, «Geothermal energy and heat storage,» 2002.
- [28] K. Labs y K. Harrington, «Proceedings Earth Shelter Performance and Evaluation,» *Architectural Extension/Oklahoma University* , pp. 41-45, 1986.
- [29] M. Cunha, J. Lin, M. Siroux y C. Fond, «Influence of an improved surrounding soil on the energy performance and the design length of earth-aire heat exchanger.,» 2019 .
- [30] IDAE, «Guía técnica: Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización.,» 2012.
- [31] M. C. Peel, B. L. Finlayson y T. A. McMahon, «Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification,» *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007.
- [32] REHAU, «Components for creating underground ventilation systems,» 2016.
- [33] G. Mihalakakou, J. Lewis y M. Santamouris, «On the heating potential of buried pipes techniques - application in Ireland,» *Energy and Buildings*, vol. 24, pp. 19-25, 1996.
- [34] K. Papakostas, A. Tsamitros y G. Martinopoulos, «Validation of modified one-dimensional models simulating the thermal behavior of earth-to-air heat exchangers—

- Comparative analysis of modelling and experimental results,» *ScienceDirect*, vol. Geothermics, nº 82, pp. 1-6, 2019.
- [35] K. Agrawala, R. Misrab y G. Agrawala, «The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system.,» 2019 .
- [36] O. Cabello, M. Sanchez y A. d. Amo, *NZEB. Edificio emisiones cero*.
- [37] S. Vegas Barbado, *Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario*, Universidad de Valladolid , 2016.
- [38] G. Llopis Trillo y V. Rodrigo Angulo, «Guía de la energía geotérmica,» Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Madrid, España, 2009.
- [39] K. Taurines, S. Girous-Julien y C. Menezo, «Energy and thermal analysis of an innovative eart-to-air heat exchanger: Experimental investigations,» *Energy and Builidings*, vol. 187, pp. 1-15, 2019.
- [40] Z. Liua, Z. (. Yua, T. Yangd y M. E. Mankibic, «Experimental and numerical study of a vertical earth-to-air heat exchanger system integrated with annular phase change material,» *Energy Conversion and Management*, nº 186, pp. 433-449, 2019.
- [41] B. Givoni y L. Katz, «Earth Temperatures and Underground Buildings,» Kiryat, Israel, Sin fecha.
- [42] H. Wei y D. Yang, «Performance evaluation of flat rectangular earth-to-air exchanger in harmonically fluctuating thermal environments.,» 2019.
- [43] REHAU, «Intercambiador aire-tierra para ventilacion controlada, gama de productos 3423000/5 IBE,» 2010.
- [44] REHAU, «REHAU,» 2020 . [En línea]. Available: <https://www.rehau.com/es-es/energia-geotermica>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [45] C. J. García Ballano, C. Monne Bailo, M. Sánchez Iturbe y E. García Aparicio, «CIEM. Primer Edificio de Consumo Casi Nulo de titularidad municipal en Zaragoza. Estrategia de ejecución y funcionamiento.,» de *CONTART 2018: VII Convención de la Edificación* , Zaragoza, 2018.
- [46] I. A. d. Estadística y G. d. Aragón, «Datos climatológicos,» [En línea]. Available: <https://servicios3.aragon.es/iaeaxi/tabla.do?accion=volver&type=pcaxis&file=14050201.px&path=%2F14%2F05%2F02%2F&volver=Volver>. [Último acceso: 2021].
- [47] A.Tzaferis, D.Liparakis, M.Santamouris y A.Argiriou, «Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers,» *Energy and Buildings*, vol. 18, 1992.
- [48] B. Sanner, C. Karytsas, D. Mendrinos y L. Rybach, «Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe.,» *Geothermics*, vol. 32, pp. 579-588, 2003.

- [49] Á. t. d. L. d. C. e. E. d. G. Vasco, «Ficha de ensayo. Conductividad térmica de materiales aislantes.,» Vitoria, España. , 2020.
- [50] H. Li, L. Ni, Y. Yao y C. Sun, «Annual performance experiments of an earth-air heat exchanger fresh air-handling unit in severe cold regions: Operation, economic and greenhouse gas emission analyses.,» *Renewable Energy* , nº 146, pp. 25-37, 2020.
- [51] A. Pakari y S. Ghani, «Performance evaluation of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: an experimental study.,» *Energy Conversion and Management*, nº 201, 2019.
- [52] H. Díaz-Hernández, E. Macias-Melo, K. Aguilar-Castro, I. Hernández-Pérez, J. Xamán, J. Serrano-Arellano y L. López-Manrique, «Experimental study of an earth to air heat exchanger (EAHE) for warm humid climatic conditions.,» *Geothermics*, nº 84, 2020.
- [53] H. Li, L. Ni, Y. Yao y C. Sun, «Experimental investigation on the cooling performance of an Earth to Air Heat Exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture.,» *Energy and Buildings*, nº 196, pp. 280-292, 2019.
- [54] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux y C. Fond, «Influence of an improved surrounding soil on the energy performance and the design length of earth-air heat exchanger.,» *Applied Thermal Engineering*, nº 162, 2019.
- [55] H. Wengang, L. Yifeng, L. Yanhua y L. Mingxin, «Application of Earth-air heat exchanger cooling technology in an office building in Jinan city,» *Energy Procedia* , nº 158, pp. 6105-6111, 2019.
- [56] Z. Liu, Z. (. Yu, T. YAng, S. Li, M. E. Mankibi, L. Roccamena, D. Qin y G. Zhang, «Designing and evaluation a new earth-to-air heat exchanger system in hot summer and cold winter areas.,» *Energy Procedia* , nº 158, pp. 6087-6092, 2019.
- [57] G. Yoon, H. Tanaka y M. Okumiya, «Study on the design procedure for a multi-cool/heat tube system.,» *Solar Energy*, nº 83, pp. 1415-1424, 2009.
- [58] REHAU, «Ground air heat exchanger: Banff and Buchan College, Fraserburgh, Scotland.,» 2011.
- [59] REHAU, «Ground-air heat exchanger systems : Carclaze community primary school, St. Austell, Cornwall.,» 2009.
- [60] REHAU, «Awadukt thermo ground-air heat exchanger system for controlled ventilation,» 2010.
- [61] S. M., «Use of earth to air heat exchangers for cooling.,» *AIVC-Ventilation Inf. Pap.* , pp. 1-8, 2006.
- [62] M. M., «Energy-efficient buildings in India,» Tata Energy Research Institute(TERI),, 2001.
- [63] J. Darkwa, G. Kokogiannakis, C. Magadzire y K. Yuan, «Theoretical and practical



- evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system.,» *Energy Build*, nº 43, p. 728–736, 2011.
- [64] A. Kanth y T. Chakraborty, «Numerical analysis of geothermal tunnels.,» *Int. J. Res. Eng. Technol.* , nº 4, pp. 740-746, 2015.
- [65] REHAU, «Ground-air heat exchanger system: wembley manor school, London,» 2008.
- [66] G.N.Mavroyanopoulos y S.Kyritsis, «The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger,» *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 36, nº 3, pp. 263-268, 1986.
- [67] G. Sharan, «Development and some applications of earth tube heat exchanger in Gujarat,» 2004.
- [68] G. Sharan, H. Prakash y R. Jadhav, «Performance of Greenhouse Coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in Closed-Loop Mode.,» 2004.
- [69] H. Bernier, G. Raghavan y J. Paris, «Evaluation of soil heat exchanger storage system for a greenhouse.,» 1991.
- [70] N. Elminshawy, A. Mohamed, K. Morad, Y. Elhenawy y A. Alrobaian, «Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climate,» *Appl. Therm. Eng.*, nº 148, pp. 1-9, 2019.
- [71] S. M. Díaz, «El terreno como intercambiador. Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta.,» Universidad Politécnica de Madrid , Madrid, España. , 2018.
- [72] A. M. Cabezas, «Eficiencia energética a través de la utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real 'Casa Pomaret'.»,» Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2012.
- [73] M. D. Paepe y A. Janssens, «Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers,» *Energy and Buildings* , vol. 35, nº 4, pp. 389-397, 2003.
- [74] C. Jacovides y G. Mihalakakou, «An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes,» *Renewable Energy* , vol. 6, nº 8, pp. 893-900, 1995.
- [75] Benkert, Heidt y Scholer, «Calculation tool for earth exchangers, GAEA,» de *Fifth International IBPSA Conference*, Praga, República Checa, 1997.
- [76] V. Badescu, «Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house,» *Renewable energy* , vol. 32, nº 5, pp. 845-855, 2007 .
- [77] J. Vaz, M. A. Sattler, E. D. d. Santos y L. A. Isoldi, «Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger,» *Energy and Buildings* , vol. 43, nº 9, pp. 2476-2482, 2011.
- [78] H. Wu, S. Wnag y D. Zhu, «Modelling and evaluation of cooling capacity of earth–air–pipe systems,» *Energy Conversion and Management* , vol. 48, nº 5, pp. 1462-1471, 2007.
- [79] Bansal, Misra, D. Agrawal y Mathur, «Performance analysis of earth–pipe–air heat

- exchanger for winter heating,» *Energy and Buildings* , vol. 41, n° 11, pp. 1151-1154, 2009.
- [80] S. K. Soni, M. Pandey y V. N. Bartaria, «Ground coupled heat exchangers: A review and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , vol. 47, pp. 83-92, 2015.
- [81] T. S. Bisoniya, A. Kumar y P. Baredar, «Study on calculation models of earth-air heat exchanger systems,» *Journal of Energy* , 2014 .
- [82] K. H. Lee y R. K. Strand, «The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 486-494, 2008.
- [83] V. Gnielinski, «Neue Gleichungen für den Wärme-und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen,» *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 41, n° 1, pp. 8-16, 1975.
- [84] M. d. l. Presidencia, «Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.,» 2021.
- [85] F. J. R. Martinez, J. F. S. J. Alonso, E. V. Martinez y M. A. A.-G. Plasencia, DTIE 8.01: Recuperación de energía en sistemas de climatización., ATECYR , 1996.
- [86] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, Fundamentos de transferencia de calor, Prentice Hall , 1999.
- [87] D. Pahud, «Geothermal energy and heat storage,» 2002.
- [88] V. Gnielinski, *Int. Chem. Eng.* , vol. 16, 1976.
- [89] B. Petukhov, Advances in Heat Transfer, Nueva York : Academic Press, 1970.
- [90] A. Colburn, *Trans. AIChE*, vol. 29, 1933.
- [91] F. Dittus y B. L.M.K., *Publications on Engineering* , vol. 2, p. 443, 1930.
- [92] S. E.N. y G. Tate, *Ind. Eng. Chem*, vol. 28, 1936.
- [93] S. Whitaker, «Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles,» *AIChE Journal* , vol. 18, n° 2, pp. 361-371, 1972.
- [94] IDAE, «Guía técnica: Condiciones climáticas exteriores de proyecto.,» 2010.
- [95] «El transporte sigue siendo el mayor emisor de CO2 en España,» *Ballena Blanca* , n° 23, 2020.
- [96] A. D. Chiasson, Advanced in modelling of ground-source heat pump systems, Windsor, Canada, 1999.
- [97] M. Santamouris, «Use of Earth Exchangers for Cooling,» *Ventilation Information Paper*, vol. 11, 2006 .
- [98] T. Kusuda, «Earth temperatures and thermal diffusivity at selected stations in the United States.,» *ASHRAE Transactions* , vol. 71, pp. 61-75 , 1965.

- [99] G. Hellström, «Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers,» Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2005.
- [100] REHAU, «Awadukt thermo ground-air heat exchanger system for controlled ventilation.,» 2010 .
- [101] H. Baehr y K. Stephan, Heat and Mass Transfer, Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [102] V. Lunardini, Heat transfer in cold climates, Van Norstrand Reinhold Company, 1981.
- [103] K. T. y A. P.R., «Earth teperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States,» *ASHRAE Transactions*, vol. 71, pp. 61-75, 1965.
- [104] IDAE, «Guía técnica: Ahorro de y recuperacion de energía en instalaciones de climatización.,» 2012.
- [105] F. J. Rey, «La recuperación de calor en las instalaciones de ventilación.,» de *Jornada técnica: Instalaciones térmicas en edificios de viviendas y su gestión*, 2015.

# ANEXOS

## Anexo 1: Resumen Directiva 2010/31/UE

La Directiva 2010/31/UE introdujo el concepto de Edificio de Energía Casi Nula, EECC, el cual está definido como *‘edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, que se determinará de conformidad con el anexo I. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno’* [11].

Uno de los objetivos principales de esta Directiva es que todos los edificios públicos de nueva construcción serán de consumo energético casi nulo para finales de 2018 y este requisito será obligatorio para los edificios privados para finales de 2020.

La definición de este tipo de edificios varía entre países, pero en todos ellos se trata de un edificio de alta eficiencia energética, en el que su consumo mayoritariamente se suministra mediante fuentes renovables, ya sea mediante elementos activos o pasivos.

Los objetivos principales de esta directiva son los siguientes:

- Establecer un sistema de referencia de estándares nacionales de eficiencia energética para verificar los consumos de los Estados miembros, para su comparación y supervisión.
- Estos certificados de eficiencia energética serán obligatorios para el alquiler y venta de cualquier propiedad.
- Elaborar planes nacionales para incentivar a propietarios a realizar mejoras de eficiencia energética.

Se pueden observar dos fases diferenciadas. Por un lado, reducir la demanda del edificio, esto implica prestar especial atención a todas las etapas de vida del edificio, incluyendo sus etapas de construcción e incluso su posterior demolición. Cuestiones como su orientación, su envolvente o los materiales usados influyen de gran manera en el rendimiento. Por otro lado, es necesario una mejora del consumo mediante el uso de equipos con mejores eficiencias y menores consumos, desde los electrodomésticos a los implicados en la climatización del edificio, así como una mejor educación de los usuarios.

## Anexo 2: Test de Respuesta Térmica, TRT

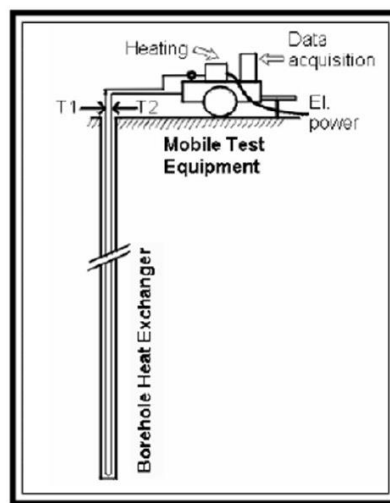
El test de respuesta térmica es un ensayo utilizado para determinar las propiedades del terreno, en concreto la conductividad térmica efectiva, la resistencia térmica, la capacidad térmica volumétrica y la difusividad, con el fin de dimensionar la instalación correctamente.

### *Funcionamiento del TRT*

Mediante una perforación en el terreno, habitualmente una de las propias perforaciones de la instalación, se introduce fluido en la sonda que suministra energía calorífica al terreno. Durante el intervalo de tiempo establecido (48-72 horas), se monitorizan los siguientes parámetros: las temperaturas de entrada y salida de la perforación y la potencia suministrada. Una vez conocidos estos datos se hará el estudio de las características del terreno.

El TRT consta de tres dispositivos:

- Un dispositivo de calentamiento regulable (resistencias eléctricas)
- Bomba de circulación
- Registro de datos de caudal, suministro de energía, temperatura de impulsión y de retorno



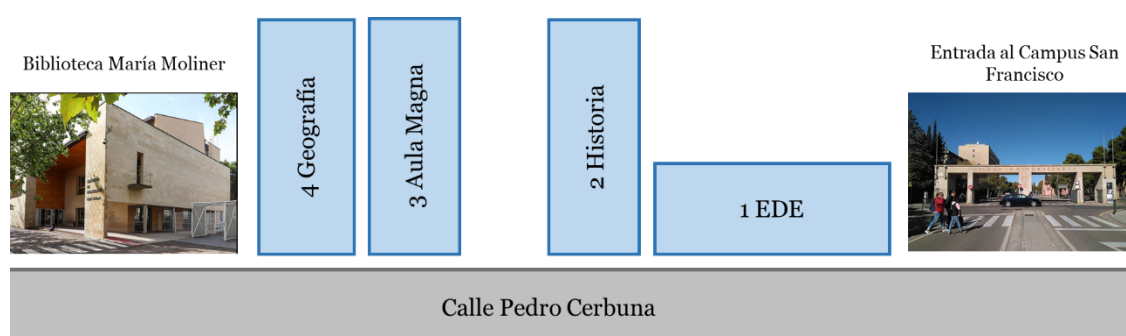
*Figura 17 Configuración de un TRT [48]*

Esta prueba es imprescindible para instalaciones de potencias térmicas superiores a 30 kW y es muy habitual en la ejecución de instalaciones que presentan bombas de calor acopladas al terreno.

## Anexo 3: Edificio de la Facultad de Filosofía, Universidad de Zaragoza.

Una de las razones principales en la elección y elaboración de este trabajo fue la posibilidad de conocer esta tecnología de primera mano debido a su instalación en el nuevo edificio de la Facultad de Filosofía de la Universidad de Zaragoza y la oportunidad de colaborar con la Unidad Técnica de Construcción y Energía, UTCE. Una de las mayores novedades del proyecto son los pozos canadienses, donde el objetivo es que sea una instalación demostrativa del potencial de esta tecnología, monitorizar el comportamiento y todas las variables implicadas y que sirva de laboratorio.

El edificio consta de cuatro pozos que proveen de ventilación a diferentes partes del conjunto de edificios, un esquema de la situación, numeración y denominación de cada uno de ellos se puede observar en la siguiente figura.



*Figura 18 Esquema de la ubicación y numeración de los pozos canadienses de la Facultad de Filosofía, Unizar. Fuente: elaboración propia.*

A continuación, se van a detallar las características de la instalación, cabe destacar que la información aportada en este trabajo puede variar respecto al proyecto final debido a que el período de realización de este trabajo ha coincidido con la fase de edificación y se han podido ocasionar diferentes modificaciones del proyecto.

La composición del terreno son gravas muy compactas, cuya densidad es aproximadamente  $3000 \text{ kg/m}^3$ . En un principio, se ha estimado la conductividad térmica en  $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  y se ha considerado la posibilidad de hacer un análisis de muestras del terreno con un conductímetro (este tipo de ensayo se encuentra explicado en el anexo 4). Para conseguir una conductividad térmica superior, se han incorporado arcillas como material de relleno en una proporción del 25-35% en tres de los pozos, el pozo restante se ha rellenado en su totalidad con arcilla. Destacar que el pozo número 1, debido a la estructura del edificio bajo el que se encuentra, está confinado entre muros laterales de hormigón, lo que se espera que provoque un comportamiento del terreno diferente al del resto de los intercambiadores. La profundidad de enterramiento varía entre 4 y 8 m.

Respecto a los conductos presentes en la instalación, se han incluido tres tipos diferentes con el objetivo de estudiar el comportamiento de cada uno, en la siguiente tabla se han recogido sus datos:

Tabla 20 Tipos de conductos presentes en la instalación de Filosofía y Letras. Fuente: elaboración propia a partir de los datos aportados por la UTCE.

Material	Diámetro [m]	Espesor [m]
Hormigón	0,3	0,06
Polietileno corrugado	0,265	0,013
PVC	0,3026	0,062

En la siguiente tabla se han resumido las características dimensionales de los cuatro pozos:

Tabla 21 Características dimensionales del intercambiador del edificio de la facultad de Filosofía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos aportados por la UTCE.

Pozo	1. EDE	2. HISTORIA	3. AULA MAGNA	4. GEOGRAFÍA
Tipos de conductos	Hormigón, PVC, Polipropileno	PVC, Polipropileno	Hormigón, PVC, Polipropileno	PVC, Polipropileno
Longitud [m]	43,82	26,45	23,73	28,23
Número de conductos	28	15	21	15
Área de intercambio térmico total [m]	1083,5	330,15	10294	6404
Caudal total [m <sup>3</sup> /s]	13530	6404	437,83	350,37

La instalación se ha diseñado para asegurar una velocidad del aire en el interior del conducto de alrededor de 2 m/s. La totalidad del caudal de impulsión es de 36.700 m<sup>3</sup>/h, siendo la sección total de los conductos superior a 5 m<sup>2</sup>, siendo una de las instalaciones más grandes realizadas hasta el momento.

A continuación, se pueden observar uno de los pozos de captación ya construido, en concreto el correspondiente al pozo número 4 (Geografía), y los conductos de PVC utilizados en la instalación.





*Figura 19 Vista aérea y frontal del pozo de captación correspondiente al pozo número 4 (Geografía).  
Fuente: fotografías obtenidas durante la visita a la obra*



*Figura 20 Conductos de PVC corrugados (negros) y lisos (naranjas). Fuente: fotografías obtenidas durante la visita a la obra.*

Otros componentes imprescindibles en la instalación son los recuperadores de calor, en este caso se han instalado rotativos, también se han dispuesto ventiladores de velocidad variable, estos últimos están situados en los pozos de descarga, se descartó colocarlos en los de captación por falta de espacio. Como sistemas de control, se ha proyectado la incorporación de sondas de temperatura en el terreno, situadas en la entrada, salida y en dos posiciones intermedias a lo largo del pozo. Además, se instalarán sondas de calidad del aire ambiente en los espacios a climatizar. Debido a la dificultad de la medición del caudal en el interior de los conductos, se ha

decidido que se medirá mediante la curva de presión de los ventiladores y no se dispondrá de ningún medidor en el interior de los conductos.

Al tratarse de una instalación pensada como laboratorio y para experimentación, se puede ver en los datos detallados anteriormente la variabilidad de las dimensiones y las características, así como todos los equipos de control destinados a monitorizar el sistema.

Otros detalles de la instalación relativos a la climatización del edificio se comentan a continuación:

- No es posible conseguir todo el caudal necesario para la ventilación del edificio, por ello, parte del aire exterior no se atemperará ni irá pre-tratado.
- Los climatizadores del aula magna están ubicados debajo del forjado y la difusión será por desplazamiento mediante la impulsión a baja velocidad desde debajo de cada butaca.
- Los climatizadores del resto de áreas se encuentran en la cubierta del edificio, se impulsa desde los pozos para su posterior distribución en las distintas áreas.



*Figura 21 Detalles de los conductos de ventilación de la facultad de Filosofía. Fuente: fotografías obtenidas durante la visita a la obra.*



*Figura 22 Instalación de los sistemas de climatización en la cubierta del edificio de Filosofía. Fuente: fotografías obtenidas durante la visita a la obra.*

Al tratarse de un edificio en el que la mejora de la eficiencia energética se ha tenido presente a lo largo de todo el proyecto, a continuación, se enumeran otros componentes de la instalación de climatización que, junto con los pozos canadienses, también ayudan a aumentar la eficiencia:

- Recuperadores de calor rotativos.
- Producción de agua fría y caliente: bomba de calor con intercambio con el agua del freático (captación a 30 metros).
- Bomba de calor con intercambio con aire.
- Pequeña máquina de absorción.
- Almacenamiento estacional (70 m<sup>3</sup>).
- Captadores PVT.



## Anexo 4: Prueba de medición de la conductividad térmica del terreno mediante conductivímetro.

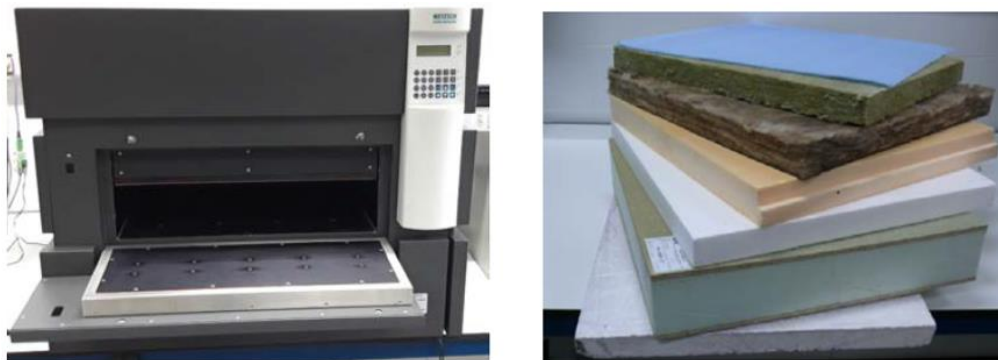
Una de las etapas fundamentales a la hora de diseñar un intercambiador tierra-aire es conocer las características del terreno, en especial la conductividad térmica. A pesar de que la conductividad puede ser estimada, conviene hacer una medición in situ puesto que este valor es importante y puede suponer una gran variación respecto al estimado, lo cual puede llevar a errores de cálculo y, por tanto, a un peor rendimiento de la instalación. Para ello, se contactó con el Área térmica del Laboratorio de Control en Edificación del Gobierno Vasco y se ha propuesto realizar una medida de la conductividad térmica mediante un conductivímetro, con el cual se puede determinar tanto la conductividad como la resistencia térmica en función del espesor [49].

Para realizar el ensayo, el primer paso necesario es la recogida de una muestra del terreno con las siguientes condiciones:

- La muestra debe ser una placa cuadrada de 40x40 cm y un espesor de 15 cm.
- Es fundamental que la placa tenga sus caras paralelas y planas, se realiza un pulido comprobando en todo momento su planitud y paralelismo en distintos puntos.

Una vez se tiene la muestra preparada se envía al laboratorio y se realiza un acondicionamiento de ésta, el cual consiste en su introducción en una cámara climática a 21°C y humedad relativa del 50%, donde se comprueba su peso cada dos días hasta que éste se estabiliza.

Por último, se realiza la medición en el conductivímetro, el cual es el modelo HFM 436/6/1 de la marca Netzch. Se determina el salto térmico y la temperatura media de la muestra, así como el flujo de calor que lo atraviesa.



*Ilustración 3 Conductivímetro y placas de muestras de diferentes materiales. Fuente: Área térmica del Laboratorio de Control en Edificación del Gobierno Vasco.*

El tiempo aproximado de duración de la prueba y emisión del informe es de tres semanas, dependiendo del tiempo de acondicionamiento necesario de la muestra. El precio del ensayo de 362 euros (IVA no incluido) por muestra. Cabe destacar que esta medida de la conductividad no es bajo norma.

## Anexo 5: Recopilación de instalaciones y análisis de datos

La lectura y recopilación de los datos de la bibliografía ha sido un elemento clave en la realización del estado de arte, se han reunido los datos de 32 instalaciones en la siguiente tabla con los parámetros dimensionales de cada una y algunas características de su funcionamiento, con especial mención a su rendimiento. Como se puede ver, en algunas de ellas no se han podido recopilar todos los datos. De las instalaciones consideradas, tres de ellas son simulación y las restantes, veintinueve, son instalaciones experimentales repartidas por diferentes países y climas con el objetivo de ilustrar todos los escenarios posibles. Posteriormente a su recopilación, se ha desarrollado un análisis de las características habituales encontradas.

Tabla 22 Recopilación de los datos de las instalaciones estudiadas. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía.

ID	Ref.	Tipo de estudio/ Lugar	Aplicación	ICTA								Notas
				Diámetro interior de conducto [m]	Espesor de conducto [m]	Número de conductos	Longitud de conducto [m]	Profundidad de enterramiento [m]	Material	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	COP	
1	[50]	Simulación/ Harbin, China	Edificio de oficinas	0,31			Superior: 15 Inferior: 16	Superior: 2,5 Inferior: 5		1808	Calentamiento: 6,2 Enfriamiento: sensible: 6,7 sensible y latente: 9,6 Media anual: 8,5	El salto térmico medio conseguido es de 13,5°C. Basado en los datos de consumo y de emisiones generados por el uso de carbón se ha conseguido una reducción de la contaminación del 82,5%. La instalación consta de un recuperador de calor.
2	[51]	Experiment. / Doha, Qatar	Investigación	0,15		1	21,5	0,4	Aluminio		Media: 10,3 Experimentación durante 10 días en el mes de Julio)	Se experimentó con modo continuo y modo interrumpido y en ambos se observó un comportamiento similar. El máximo salto térmico obtenido es de 6,5°C. En verano, se redujo el consumo energético en un 76,5%.
3	[40]	Experiment./ Changsha, China	Investigación. Instalación vertical	0,215	0,002	1	15		Acero inoxidable		--	Se instaló un tramo de 3,6 m de material de cambio de fase junto con aislante y se comprobó que su adición disminuye la fluctuación de la temperatura del aire de salida. Se tendrá que encontrar el equilibrio entre el coste que supone la longitud/espesor del PCM y el rendimiento del sistema.
4	[39]	Experiment./ Auxerre, Francia	Residencia de la tercera edad. Dos plantas, 200 m <sup>2</sup> /planta	Rectangular 0,6x0,6		2	45		Hormigón	290 m <sup>3</sup> /h	Calentamiento: 4,6 Enfriamiento: 3,1	Se incorpora el concepto del conducto en la cimentación del edificio. La fase de simulación ha demostrado que tienen un comportamiento irregular respecto a un ICTA tradicional y está fuertemente influenciado por los flujos de calor provenientes del propio edificio.

5	[52]	Experiment./ Tabasco, Mexico	Investigación	0,1016		1	6	2,5			---	Se observa una disminución en la temperatura del aire de 2,8°C en la época de enfriamiento y un incremento de 3,6°C en la época de calentamiento (temp. Medias).
6	[53]	Experiment./ China	Salas de exhibiciones Dos salas de 255,8 m2 y 70,5 m2	0,31			Superior: 15 Inferior: 16	Superior: 2,5 Inferior: 5		985	Media anual: 12,5 Rango obtenido durante enfriamiento: 1,7-27,2	El salto térmico medio de enfriamiento es de 14,4°C. El COP medio de la instalación es de 12,5. Cuando existe alto contenido de humedad, el aporte del calor sensible y el latente es similar (siendo ligeramente más alto el sensible). En cambio, cuando el contenido de humedad es bajo, la transferencia de calor es prácticamente sensible en su totalidad.
7	[54]	Simulación		0,17	0,015	1		0,83			--	La adición de bentonita (un 3%) en la arena del terreno estabiliza de manera significativa el intercambio de calor e incrementa el rendimiento en un 12%. Además, esta adición puede implicar la reducción de la longitud del conducto (alrededor de un 10%).
8	[55]	Simulación/ Jinan, China	Edificio de oficinas	1,2			28	6		40680	--	El diámetro de conducto (y el caudal) es muy superior a la tendencia observada. El análisis y las conclusiones detalladas no aportan nada sobre los intercambiadores, se centra en la distribución térmica en el interior del edificio, no en el comportamiento del intercambiador.

9	[56]	Experiment./ Changsha, China	Instalación vertical	0,219		1	15.5		Acero inoxidable		--	Se estudió la influencia de la velocidad en la potencia de enfriamiento, un incremento de velocidad de 1 a 2,1 m/s implicó un aumento de la potencia de enfriamiento del 94,1%, en cambio cuando se aumentó a 3,2 m/s solo se incrementó la potencia en un 38,5%. El rango de temperatura de salida es de entre 22.4°C y 24.2°C.
10	[57]	Experiment./ Aichi, Japón	Instituto Cuatro plantas, 4240 m2	0,5		9	40	Superior: 2,5 Inferior: 4		16800	--	Se redujo la demanda energética del edificio un 28,8%.
11	[58]	Experiment./ Escocia	Edificio universitario	0,25		30	42	1,5		16000	--	El salto térmico medio obtenido en invierno es de 9°C y en verano de 14°C.
12	[59]	Experiment./ Cornwall, Inglaterra	Escuela	0,25		16	30	1,5		3457	--	
13	[60]	Experiment./ Polonia	Supermercado 3250 m2	0,2		20	35	1,5		2700	--	La potencia térmica de calefacción aportada por el ICTA es de 20500kWh/año y la potencia térmica de refrigeración aportada es de 10700kWh/año.
14	[61]	Experiment./ Francia	Residencia de tercera edad 380 m2	0,2		11		2		120	--	La potencia térmica de enfriamiento aportada en los meses de verano es de 14 kW.
15	[62]	Experiment./ India	Viviendas	0,7		4	70			10194	--	El salto térmico medio obtenido en verano es de 15°C.
16	[63]	Experiment./ China	Laboratorio de investigación	0,4		6	50	3			Calentamiento: 3,2. Enfriamiento: 3,53	Se ha obtenido una reducción de la demanda de enfriamiento del 86% y de calentamiento del 62%.
17	[64]	Experiment./ India	Edificio universitario y hostel	1,2		14	120	5		30582	--	Se redujo el consumo energético entre 60-70%.
18	[65]	Experiment./ Londres, Inglaterra	Hall de entrada de una escuela	0,2		20	18	Superior: 1,5 Inferior: 1,8			--	El salto térmico medio obtenido en verano es de -14°C y en invierno de +9°C.
19	[66]	Experiment./ Grecia	Invernadero 150 m2	0,2		20	15	2			--	La temperatura media interior del invernadero se mantuvo a 8,1°C cuando la temperatura media exterior era de -0,8°C.



20	[67] [68]	Experiment./ India	Invernadero12 o m2	0,2		8	23	Superior: 2 Inferior: 3			--	Se proporcionó aire para 20 cambios de aire por hora, debido a ello el rendimiento del cultivo se incrementó en un 270%.
21	[69]	Experiment./ Canada	Invernadero8 o m2	0,1		26	12	0,45		3276	--	Distancia entre conductos [m] (Instalaciones verticales): 0,75
22	[70]	Experiment./ Egipto	Paneles solares Area efectiva del módulo: 1,65 m2	0,019		12	1,2	1			--	Se redujo la temperatura del panel de 55°C a 42°C. Como consecuencia, se incrementó la conversión eléctrica en un 22,98% y la potencia de salida del módulo un 18,90%.
23		Experiment./ Grecia	Edificio universitario				30	3				El máximo salto térmico conseguido es de -10°C.
24		Experiment./ Grecia	Almacén de papel 10900 m2	0,315		2	50			4500		El mayor salto térmico conseguido es de -5°C
25		Experiment./ Portugal	Complejo residencial	0,16		2	25					Los saltos térmicos medios obtenidos fueron un descenso de 8° en verano y un incremento en invierno de 11°C. Se observó un descenso de la humedad relativa del aire de entre 25 y 30% (muy significativo en Portugal) y una reducción en el consumo de energía del 95%.
26		Experiment./I talia	Complejo residencial	0,4			40	4	PVC			El salto térmico medio obtenido es 2,9°C. Cuenta con una unidad de recuperación de calor.
27	[19] [18]	Experiment./ Zaragoza, España	Incubadora de empresas / Oficinas	0,3	0,05	18	50	Superior: 4m, Inferior: 6m	Hormigón	5480- 15550	Rendimient o anual: 5,07 Máximo obtenido: 80 (comienzo de primavera y otoño).	El ahorro de energía aportado al edificio es un 27,5% del total consumido. Sería deseable el implementar una entrada directa del aire de climatización desde el exterior, sin pasar por los tubos; un by-pass que permitiera que, si las condiciones del aire de salida de los tubos fueran peores que las del aire exterior, pudiera tomar el aire directamente.

28	[37] [20]	Experiment./ Valladolid, España	Edificio universitario			52	16,7	Fila 1: 2,02 m Fila 2: 2,72 m Fila 3: 3,42 m	Polietileno de alta densidad		--	El aporte térmico del ICTA es de 25.000 kWh/año.
29	[17]	Experiment./ Pamplona, España	Edificio	0,5		8	30	2			--	El aporte energético de los pozos es 6,06% del total de climatización del edificio. El aporte energético externo (calefacción, refrigeración, electricidad) ha disminuido un 89%. El gasto de refrigeración es el que tiene un descenso de consumo más acusado, un 95,77%.
30	[21]	Experiment./ Móstoles, España	Viviendas			45	35				--	El conjunto completo de instalaciones bioclimáticas reduce el consumo energético un 78%.
31	[71]	Experiment./ Madrid; España	Colegio Mayor	0,25	0,0088	8	52		Polipropile no		--	
32	[72]	Experiment./ Barcelona, España	Vivienda unifamiliar	0,15	0,0056	21	8	2	Hierro galvanizado		--	En este caso se quiere asegurar régimen laminar, cuando normalmente se recomienda régimen turbulento.

A continuación, se van a exponer las distintas conclusiones que han derivado de este estudio de la bibliografía.

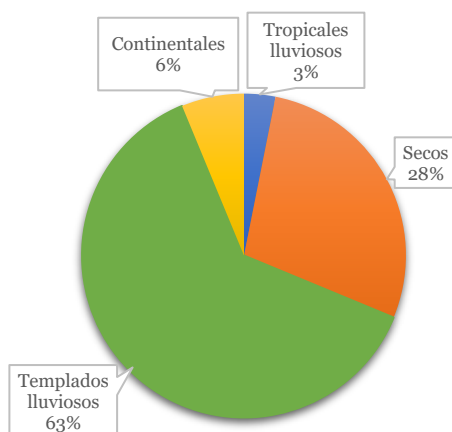
#### *Condiciones relativas a la ubicación de la instalación*

Los datos de las propiedades térmicas del terreno son escasos, salvo en las instalaciones de investigación pura de esta tecnología en los que se ha estudiado la influencia de la mezcla de materiales en el relleno.

Por otro lado, se ha hecho un estudio de los diferentes climas basándose en la ubicación de las instalaciones y la clasificación climática de Köppen [31], en la siguiente tabla se pueden observar los grupos climáticos principales y el número de instalaciones asociado. Se ha generalizado el estudio y no se han considerado los subgrupos con el objetivo de tener una visión más global de la tendencia, la cual ha sido ilustrada en el gráfico 14.

*Tabla 23 Grupos de climas presentes en las instalaciones. Fuente: elaboración propia basada en datos de la bibliografía.*

Grupo	Clima	Número de instalaciones
A	Tropicales lluviosos	1
B	Secos	9
C	Templados lluviosos	20
D	Continetales	2
E	Polares	-
H	De alta montaña	-
Total		32



*Gráfica 20 Tendencia de los climas presentes en las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia.*

#### *Diseño y elementos de la instalación*

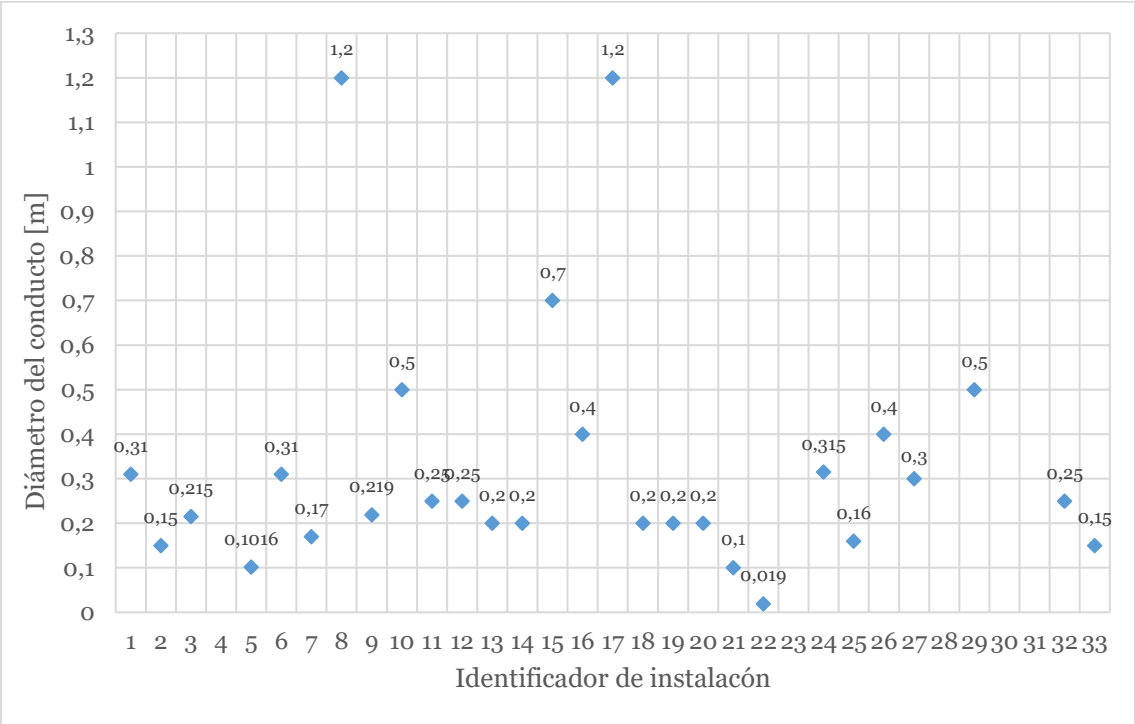
##### **1. Valores de dimensionado de la instalación**

Respecto a los parámetros principales de la instalación, en la siguiente tabla se pueden observar el valor más habitual y el rango de valores presentes en los intercambiadores considerados:

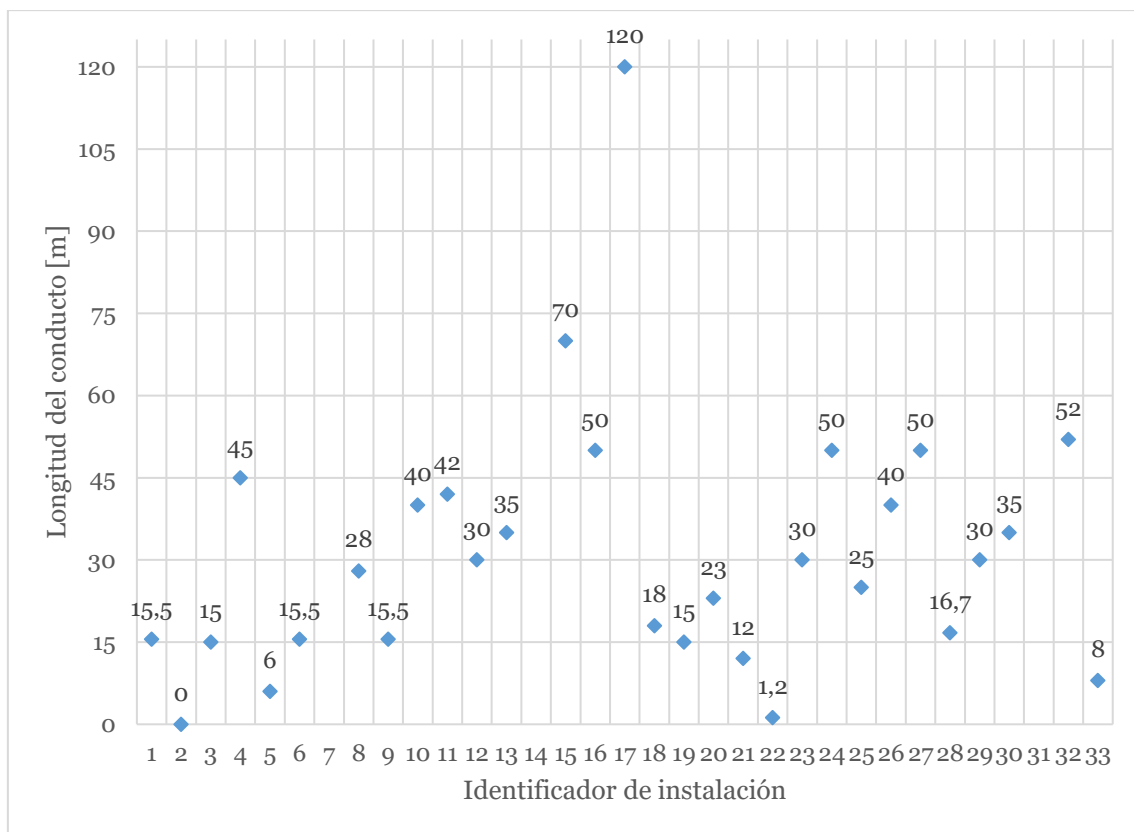
Tabla 24 Valores habituales de los parámetros presentes en la bibliografía. Fuente: elaboración propia basada en datos de la bibliografía.

Parámetro	Valor más habitual	Rango de valores
Diámetro interior	0,2 m	0,02-1,2 m
Espesor de conducto	0,005 m	0,002-0,015 m
Longitud de conducto	25 m	1,2-120 m
Profundidad de enterramiento	2 m	0,4-7 m

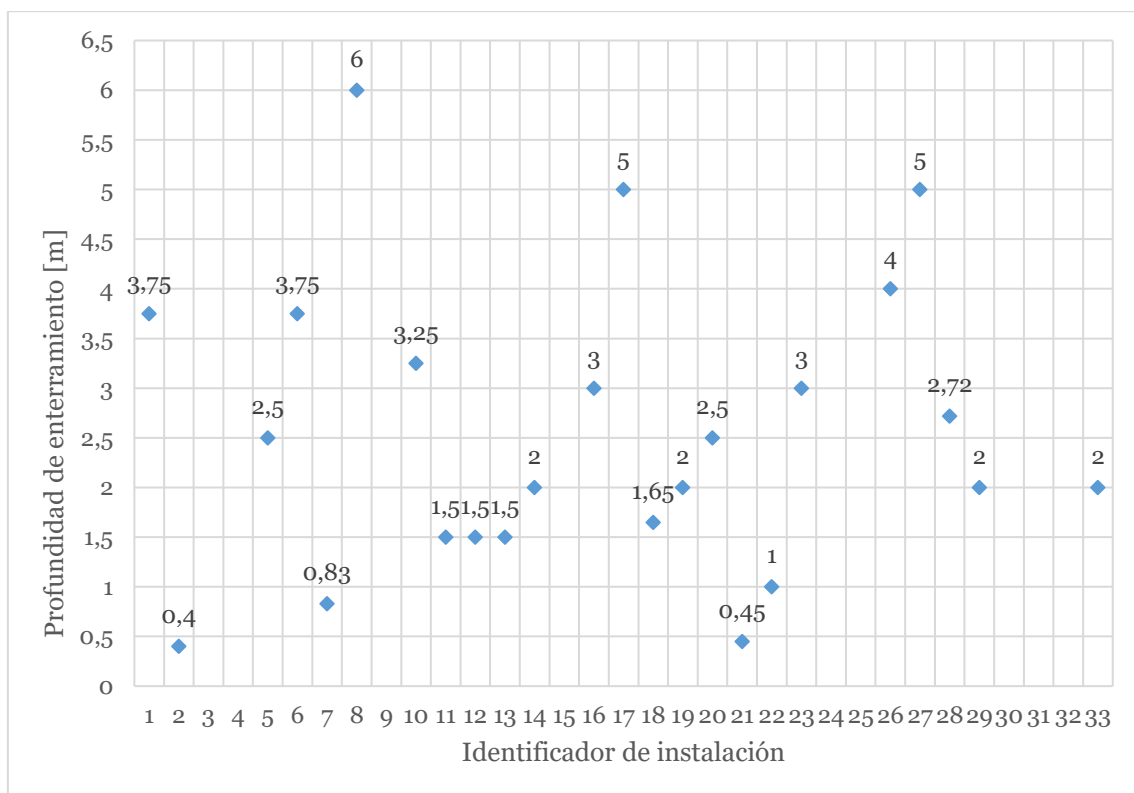
A continuación, se han ilustrado los valores de los distintos parámetros de las instalaciones, los valores exactos de cada instalación se indican al lado del marcador.



Gráfica 21 Valores de los diámetros de conducto de las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia basado en los datos de la bibliografía.



Gráfica 22 Valores de longitud del conducto de las distintas instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia basado en los datos de la bibliografía.



Gráfica 23 Valores de profundidad de enterramiento de las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia basado en los datos de la bibliografía.

## 2. Tipos de sección

La mayoría de las instalaciones poseen sección circular, sin embargo, una de ellas presenta sección rectangular. Las diferencias entre ellas son que, en la sección rectangular, con un área de sección transversal igual al de la sección circular, la variación de la temperatura de salida se reduce en un 24.7% y su desfase térmico es 22.67 días más largo [42]. A su vez, el rango de perturbación térmica del suelo circundante a los tubos es menor, lo que provoca que la temperatura del tubo sea más estable [42]. Sin embargo, la caída de presión y el consumo de energía del ventilador es mayor que la sección circular, y por lo tanto el valor del coeficiente de rendimiento (COP) es menor, en concreto un 47% [42].

## 3. Número de conductos

El número de conductos presentes en las instalaciones es variado debido a que es dependiente del caudal total y del caudal individual que puede circular por cada conducto, es por ello, que no hay una tendencia ya que se escoge el valor más adecuado para suplir las necesidades de ventilación.

## 4. Condiciones de operación

El funcionamiento interrumpido es el preferido frente al continuo debido a que permite la recuperación térmica del terreno adyacente a los conductos, además, la mayoría de los edificios considerados se tratan de edificios no residenciales, donde prima el uso interrumpido debido a las características de uso de sus instalaciones. A continuación, se han clasificado los usos de los 28 edificios considerados donde un 28,6% son residenciales (viviendas, residencias de tercera edad y universitarias) y un 53,6% son edificios de gran capacidad (universidades, escuelas, oficinas y sector servicios), mientras que el 17,9% restante son aplicaciones de distintos tipos (refrigeración de paneles solares y climatización de almacenes e invernaderos).

*Tabla 25 Usos de los edificios de la bibliografía. Fuente: elaboración propia basada en datos de la bibliografía.*

Tipo de edificio	Número de instalaciones	%
Oficinas/ Edificios de investigación	6	21,4%
Residencial	8	28,6%
Escuelas/ Universidades	7	25,0%
Sector servicios	2	7,1%
Sector industrial	4	14,3%
Otros (paneles solares)	1	3,6%
Total	28	100,0%

## 5. COP

Como se puede observar en la tabla 21 ‘Recopilación de los datos de las instalaciones estudiadas’, no se han obtenido una gran cantidad de datos sobre el COP de las instalaciones. El rango habitual observado es entre 3 y 6, siendo éstos los valores medios puesto que se han dan

picos dependiendo de la época del año y dependiendo de si se trata de refrigeración o calentamiento. Un ejemplo de ello es el edificio CIEM en Zaragoza, donde se ha conseguido un COP máximo por encima de 80 en momentos puntuales al comienzo de la primavera y el otoño [18]. Las condiciones en las que se ha medido el COP, diferenciando entre enfriamiento y calentamiento, son determinantes para el estudio del rendimiento de las instalaciones. En el caso de los intercambiadores estudiados en la bibliografía, no se pueden sacar conclusiones debido a la falta de datos, tanto de valores de COP como de condiciones en los que ha sido cuantificado ese valor. En la siguiente tabla, se han recopilado los datos de COP de las instalaciones de los que se poseen:

*Tabla 26 Datos de COP de las instalaciones estudiadas en la bibliografía. Fuente: elaboración propia basado en datos de la bibliografía.*

Instalación	Calentamiento	Enfriamiento		Media anual	Notas
	Sensible	Sensible	Total		
1	6,2	6,7	9,6	8,5	
2			10,2		Experiment. únicamente durante 10 días en julio
4	4,6	3,1			
6	Media: 12,5 Rango: 1,7-27,2				
16	3,2	3,53			
27				5,07 Máximo obtenido: 80	Obtenido a comienzo de la primavera y el otoño.

## Anexo 6: Modelos matemáticos para el diseño de intercambiadores

Los primeros modelos matemáticos calculaban mediante ecuaciones de transferencia de calor en sistemas 1D estacionarios, la temperatura de salida del intercambiador a partir de la temperatura de entrada y la temperatura del suelo adyacente [73] [74] [75]. En los años 90, se estudiaron modelos bidimensionales que permitieron calcular la temperatura del terreno a diferentes profundidades usando el método de los elementos finitos para resolver las ecuaciones de conducción en dos dimensiones [76]. En la actualidad se han desarrollado modelos tridimensionales usando métodos de mecánica de fluidos computacional que permiten resolver todo tipo de geometrías y calcular las fluctuaciones de temperatura alrededor de los conductos [77] [78] [79] [80] [81]. Algunos softwares comerciales como son TRNSYS, Energy Plus o FLUENT han desarrollado modelos matemáticos para simular el comportamiento de los ICTA.

A pesar de este gran desarrollo de los modelos, para realizar un primer dimensionado de este tipo de intercambiadores y una valoración económica orientativa, los modelos unidimensionales son los más usados, en concreto, el modelo GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) [75] y el modelo de De Paepe-Janssens [73].

### Modelo GAEA modificado

El modelo GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) [75] permite calcular la temperatura del aire dentro de la tubería, para ello estima los coeficientes de transmisión de calor del conducto, del aire y del suelo a partir de los materiales, las condiciones de flujo y la geometría.

Las suposiciones consideradas en este modelo son las siguientes:

- El terreno adyacente a los conductos es homogéneo y sus propiedades son constantes.
- Si la instalación está formada por varios conductos o un conducto en forma de serpentín, el gradiente de temperatura generado alrededor de los conductos no afecta a los conductos adyacentes.
- La temperatura del suelo se calcula a partir de la temperatura del aire ambiente y de las propiedades físicas y térmicas del suelo.
- No existe congelación en el suelo.
- No se forma condensado en los conductos.

La temperatura del terreno adyacente a los conductos depende de dos tipos de transferencia de calor, la transferencia desde la capa superficial del terreno hasta la profundidad de enterramiento de la instalación y de la transferencia de calor del aire en el interior de los conductos hacia las paredes. El modelo calcula un parámetro adimensional,  $U^*$ , el cual calcula la aportación de los dos tipos de transferencia de calor, así como el efecto de la configuración geométrica:



$$U^* = 2\pi \frac{\lambda}{U_L} \frac{1}{\ln \left[ \frac{z}{R} + \sqrt{\left(\frac{z}{R}\right)^2 - 1} \right]}$$

Donde:

$\lambda$  es la conductividad térmica del suelo [W/mK]

$U_L$  es el coeficiente global de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup>·K]

$z$  es la profundidad de enterramiento del centro del conducto [m]

$R$  es el radio del conducto [m]

La temperatura del terreno en contacto con las paredes del conducto,  $T_{pared}$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_{pared} = \frac{U^* \cdot T_{terreno} + T_{aire}}{U^* + 1}$$

Donde:

$T_{terreno}$  es la temperatura del suelo en contacto con las paredes del conducto [°C]

$T_{aire}$  es la temperatura del aire dentro del conducto [°C]

La diferencia entre  $T_{pared}$  y  $T_{terreno}$  es que  $T_{pared}$  es la media ponderada entre la temperatura del aire en el interior y la temperatura de la pared en contacto con el terreno, teniendo en cuenta el factor  $U^*$ , mientras que  $T_{terreno}$  se supone que es uniforme a largo de toda la longitud puesto que la temperatura del terreno no se ve perturbada.

Se asume que el suelo es homogéneo con difusividad térmica constante, la temperatura no perturbada del suelo a cualquier profundidad se calcula con la siguiente formula:

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{365} \left( t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha\pi}} \right) \right)$$

Donde:

$T(z, t)$  es la temperatura del terreno [°C] a una profundidad  $z$  (m) y un momento del año  $t$  [horas]

$T_m$  es la temperatura anual del suelo [°C] a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura

$A_s$  es la oscilación de la temperatura superficial [°C]

$t$  es el tiempo [días]

$t_o$  es el desfase [días]

$\alpha$  es la difusividad térmica del suelo [m<sup>2</sup>/día]

El término exponencial de la fórmula tiene en cuenta la profundidad de enterramiento del conducto y el término coseno, la variación de temperatura anual. Este modelo no tiene en cuenta la influencia de la radiación solar, la cual podría tener un impacto significativo.

Para calcular la transferencia de calor al conducto, la longitud total de éste se divide en 100 segmentos iguales y se realizan los cálculos para cada uno de ellos. El aire que circula por cada

segmento se supone que tiene una temperatura diferente, de modo que se produce una variación de temperatura entre la entrada y la salida de ese segmento.

El intercambio de calor para cada segmento se calcula con la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \Delta z U_T (T_{pared} - T_{aire})$$

Donde

$\dot{Q}$  es la transferencia de calor entre el terreno y el aire [W]

$\Delta z$  es la longitud de cada segmento de conducto [m]

$U_T$  es el coeficiente de transferencia de calor global entre la corriente de aire y el terreno por unidad de longitud del conducto [W/mK].

El modelo original calculaba el coeficiente de transferencia global considerando únicamente la transferencia de calor convectiva entre el aire y el conducto. En la versión modificada del modelo [34], se considera también la transferencia de calor por conducción entre las paredes del conducto y entre el conducto y el terreno.

Para el cálculo del coeficiente global se determina mediante las resistencias térmicas del sistema [82]:

Resistencia de convección del aire:  $R_{aire} = \frac{1}{2\pi R_1 h_{aire}}$

Resistencia de conducción entre las paredes del conducto:  $R_{pared} = \frac{1}{2\pi L \lambda_p} \ln \frac{R_1 + R_2}{R_1}$

Resistencia de conducción entre el conducto y el terreno:  $R_{pared-terreno} = \frac{1}{2\pi L \lambda_{terreno}} \ln \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2}$

Donde:

$R_1$  es el radio interior del conducto [m]

$R_2$  es el radio exterior del conducto [m]

$R_3$  se supone igual al radio interior del conducto,  $r_i$  [m]

$L$  es la longitud del conducto [m]

$h_{aire}$  es el coeficiente de convección del aire [W/m<sup>2</sup>·K]

$\lambda_p$  es la conductividad térmica del conducto [W/m·K]

$\lambda_{terreno}$  es la conductividad térmica del terreno [W/m·K]

El coeficiente de convección del aire se calcula de la siguiente manera:

$$h_{aire} = \frac{Nu \cdot \lambda_{aire}}{2R_1}$$

Donde:

$\lambda_{aire}$  es la conductividad térmica del aire [W/mK]

$Nu$  es el número de Nusselt [-]

En el caso de flujo turbulento, el número de Nusselt es el siguiente [83]:

$$Nu = 0,0214(Re^{0,8} - 100)Pr^{0,4}$$

Donde:

$Re$  es el número Reynolds [-]

$Pr$  es el número de Prandtl [-]

El número de Reynolds tiene en cuenta la velocidad del aire y su viscosidad; en el caso del número de Prandtl, un valor típico para el aire es 0,72 [75].

De este modo, el coeficiente de transferencia global queda de la siguiente manera:

$$U_T = \frac{1}{R_T \cdot A}$$

$$R_T = R_{aire} + R_{pared} + R_{pared-terreno}$$

Con este modelo de cálculo, se calcula la temperatura del aire a lo largo de la longitud el conducto, tomando como inicial que la temperatura del aire de entrada del primer segmento es igual a la temperatura del aire ambiente exterior. El modelo no aporta ningún procedimiento de cálculo de la caída de presión.

#### Modelo De Paepe-Janssens modificado

El modelo De Paepe-Janssens [73] utiliza una fórmula que relaciona la pérdida de carga del conducto con el rendimiento del sistema, conociendo el caudal de aire, la temperatura del aire de entrada y la del suelo. Se asume un valor de pérdida de carga por unidad de longitud para lograr una eficiencia térmica o un valor de temperatura de salida concreta. De este modo se determinan los parámetros de construcción del intercambiador (número, longitud y diámetro de conductos).

Esto se debe a que tanto la transferencia de calor como la pérdida de carga es directamente proporcional a la longitud del conducto, por otro lado, los diámetros pequeños incrementan la transferencia de calor, pero también la pérdida de carga.

La temperatura del terreno se calcula mediante la siguiente fórmula, de la misma forma que en el método anterior:

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{365} \left( t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha\pi}} \right) \right)$$

El flujo de calor total intercambiado con el aire se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{aire} c_{p,aire} (T_{aire,salida} - T_{aire,entrada})$$

Donde:

$\dot{m}_{aire}$  es el flujo másico del aire [kg/s]

$c_{p,aire}$  es el calor específico del aire [J/kgK]

$T_{aire,salida}$  es la temperatura del aire a la salida del ICTA [°C]

$T_{aire,entrada}$  es la temperatura del aire a la entrada del ICTA [°C].

El flujo de calor se puede calcular también de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = U_T A \Delta T_{lm}$$

Donde:

$\dot{Q}$  es el flujo de calor intercambiado con el aire [W]

$U_T$  es el coeficiente global de intercambio de calor [W/m<sup>2</sup>·K]

$A$  es la superficie de intercambio de calor [m<sup>2</sup>]

$\Delta T_{lm}$  es la media logarítmica de la temperatura [K]

De estas ecuaciones se extrae la siguiente ecuación:

$$T_{aire,salida} = T_{pared} + (T_{aire,entrada} - T_{pared}) \cdot e^{\frac{-U_T \cdot A}{\dot{m}_{aire} \cdot c_{p,aire}}}$$

Donde  $T_{pared}$  es la temperatura de la pared del conducto, la cual se asume igual a la del terreno adyacente.

El rendimiento térmico del ICTA se expresa con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{T_{aire,salida} - T_{aire,entrada}}{T_{pared} - T_{aire,entrada}}$$

O usando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\left(\frac{U_T A}{\dot{m}_{aire} c_{p,aire}}\right)}$$

De Paepe y Janssens consideraron en sus cálculos únicamente la transferencia de calor convectiva, el modelo modificado considera el coeficiente de transferencia global  $U_T$  que considera tanto la transferencia convectiva entre el aire y el conducto como la conductiva entre el conducto y el terreno. Para la obtención de este coeficiente global se usa el mismo procedimiento que para el modelo GAEA.

Los resultados de ambos modelos muestran aproximaciones satisfactorias con el comportamiento de los intercambiadores. Sin embargo, el modelo De Paepe-Janssens proporciona una mejor estimación del comportamiento térmico del intercambiador a pesar de que el modelo GAEA ofrece un análisis más complejo de la temperatura de las paredes de los conductos.

## Anexo 7: Recuperadores de calor

Los recuperadores de calor permiten aprovechar el calor sensible y latente del aire de expulsión y de ese modo aprovechar una energía que estaría siendo desperdiciada. Son dos las reducciones que se consiguen, por un lado, se reduce la central energética y con ello, los costes de inversión, y, por otro lado, el consumo energético.

Una de las condiciones que marca el RITE es que en los sistemas de climatización de los edificios en los que el caudal del aire de expulsión sea superior a 0,28 m<sup>3</sup>/s se deberá recuperar la energía del aire [84].

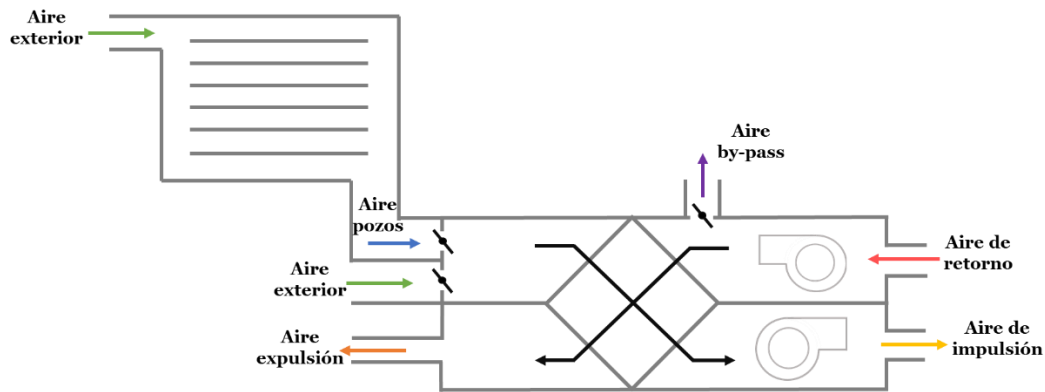


Figura 23 Sistema de ICTA con recuperador de calor. Fuente: elaboración propia.

La expresión para calcular la energía recuperada con un recuperador de calor es la siguiente:

$$E = \dot{m}_{as} \cdot \Delta h \cdot t$$

Donde:

$E$  es la energía recuperada [J]

$\Delta h$  es la diferencia de entalpía [J/kg]

$\dot{m}_{as}$  es el caudal másico de aire seco [kg/s]

$t$  es el intervalo de tiempo [s]

La entalpía del aire se calcula con la siguiente fórmula:

$$h = C_{pa} \cdot T + W(C_f + C_{pv} \cdot T)$$

Donde:

$C_{p,as}$  es el calor específico del aire seco, cuyo valor es 1,006 kJ/(kg as·°C)

$W$  es la humedad específica a la salida [kg agua/kg as]

$C_f$  es el calor del cambio de fase de vapor a líquido, cuyo valor es 2,501 kJ/kg as

$C_{pv}$  es el calor específico del vapor de agua, cuyo valor es 1,86 kJ/(kg as·°C)

### *Tipos de recuperadores de calor*

A continuación, se presentan los principales recuperadores de calor, existen dos clasificaciones para los distintos tipos, los que recuperan únicamente calor sensible y los que recuperan calor total (sensible y latente) [30].

#### *Recuperadores de placas*

El interior de estos equipos está dividido por una matriz de placas por donde se alternan los flujos del aire de impulsión y de extracción entre los pasajes que forman las placas, habiendo intercambio térmico entre ellas. Normalmente, se produce intercambio de calor sensible, pero, cuando se dan ciertas condiciones, puede producirse transferencia de calor tanto sensible y latente. La distancia entre placas influye de forma notoria en el funcionamiento y eficiencia del equipo y se deberá elegir de acuerdo con los requerimientos de la instalación. Existen dos tipos de recuperadores de placas:

- De flujos cruzados: estos equipos proporcionan grandes superficies de contacto en un espacio reducido con una buena eficacia (45-65%). Sin embargo, producen elevadas caídas de presión y condensaciones.
- De flujos paralelos: trabajan igual que flujo cruzado, pero con una eficacia superior (>80%), además estos equipos son de tamaño reducido. Son adecuados para instalaciones con caudales pequeños (50-2000 m<sup>3</sup>/h) con velocidades de aire elevadas.

#### *Recuperadores rotativos*

Se trata de un recuperador formado por un tambor por donde las corrientes de aire de impulsión y de extracción circulan alternativamente, los periodos de permanencia dependen de la velocidad de rotación del tambor. Su funcionamiento se basa en la absorción por parte del rotor del calor de la corriente más caliente y posteriormente, lo cede a la corriente más fría, intercambiando calor sensible entre ambas corrientes. Además, según las características del equipo, en el caso de que el rotor sea higroscópico, puede haber intercambio de calor tanto sensible como latente.

Existen tres tipos de recuperadores rotativos:

- Recuperador rotativo sensible: recuperan únicamente calor sensible, aunque es posible que por las características de las corrientes en ciertas épocas del año haya intercambio de humedad entre ambas. Trabajan de manera similar a los recuperadores de placas.
- Recuperador rotativo entálpico: al disponer de un rotor higroscópico, pueden recuperar calor latente. Se usan en aplicaciones donde se necesite una alta recuperación de calor sensible y cierta recuperación de calor latente. Un inconveniente de este tipo es que puede haber contaminación entre ambas corrientes. Su principal ventaja es su alta eficiencia.
- Recuperador de sorción: físicamente son iguales a los rotativos entálpicos pero su rotor ha sido sometido a un tratamiento superficial con zeolitas con el objetivo retener humedad de una corriente y transferirla a la otra. Son usados en instalaciones que

requieren una alta transferencia de calor sensible (temperatura) y de calor latente (humedad) durante todo el año, además es recomendado en climas húmedos donde se requiere una alta deshumidificación del aire exterior.

#### *Recuperadores con tubo de calor (heat pipe)*

Estos recuperadores están formados por tubos aleteados, reduciendo la resistencia de convección del aire, formando una batería. Estos tubos se dividen en dos partes, un evaporador que es la zona de mayor temperatura puesto que toma calor del ambiente y un condensador que cede calor al ambiente y es la zona de menor temperatura. Existen dos tipos:

- Recuperadores por termosifón: son dispositivos verticales donde el condensador se posiciona en la zona superior y el evaporador, en la inferior. De este modo, cuando se calienta la zona inferior, el fluido de trabajo se evapora y se eleva hacia la zona del condensador, donde al ponerse en contacto con la corriente de menor temperatura se condensa y por gravedad desciende donde vuelve a evaporarse y forma así el ciclo. Es un recuperador muy usado en los llamados ‘colectores solares de alto vacío’. Existen también dispositivos denominados de anillos cerrados en los que el flujo de vapor y de líquido circulan por tubos diferentes, consiguiendo eficacias superiores. Su principal inconveniente es la necesidad de intercambio de los flujos de aire de impulsión y de extracción puesto que, dependiendo de la época del año, uno u otro será el de mayor temperatura y el de menor; para ello será necesario un sistema de compuertas que circule cada corriente por la zona que le corresponda. Además, son sistemas que conllevan un alto coste. Sus principales ventajas son la ausencia de contaminación entre las corrientes, sus bajos costes de mantenimiento y la adaptabilidad a atmósferas peligrosas.
- Recuperadores de tipo heat pipe: están constituidos por un tubo sellado al vacío y donde se ha introducido un líquido de trabajo. Los tubos están revestidos en su interior por un material poroso el cual hace que el retorno del condensado a la zona caliente se realice mediante las fuerzas capilares. Debido a esta configuración, ambos extremos pueden actuar como condensador o evaporador y en distintas posiciones de inclinación.

#### *De dos baterías con bombas (Run around)*

Se trata de dos baterías aleteadas unidas entre sí formando un circuito de transferencia de la energía, el fluido de trabajo se circula entre las dos baterías mediante una bomba, el cual capta el calor de la corriente más caliente y lo transfiere a la corriente a menor temperatura.

A continuación, se ha recopilado las eficiencias de los tipos de recuperadores de calor y el tipo de transferencia de calor obtenido en cada uno de ellos:

Tabla 27 Eficiencias y tipo de transferencia de calor de los distintos recuperadores de calor. Fuente: DTIE 8.01. [85].

	Eficiencia	Tipo de transferencia de calor
Placas	70-90%	Sensible
Rotativos	45-65%	Sensible y latente
Tubos de calor	50-80%	Sensible
Dos baterías	40-60%	Sensible



## Anexo 8: Análisis de órdenes de magnitud de las resistencias térmicas

Se ha realizado un análisis mediante resistencias térmicas de los tres componentes implicados en el intercambio de calor: el terreno, el conducto y el aire.

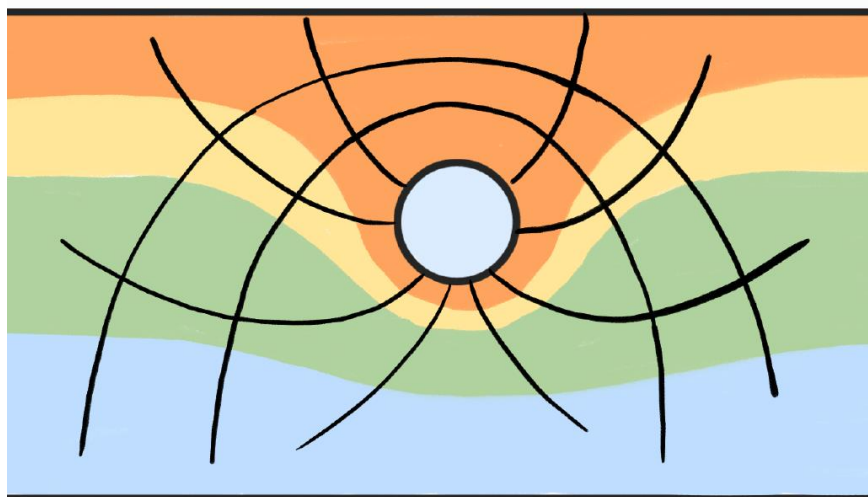


Figura 24 Diagrama de flujo de calor e isótermas. Fuente: elaboración propia.

El esquema de este circuito térmico se puede observar en la siguiente figura, donde se muestra un esquema de las resistencias del sistema y los valores característicos:

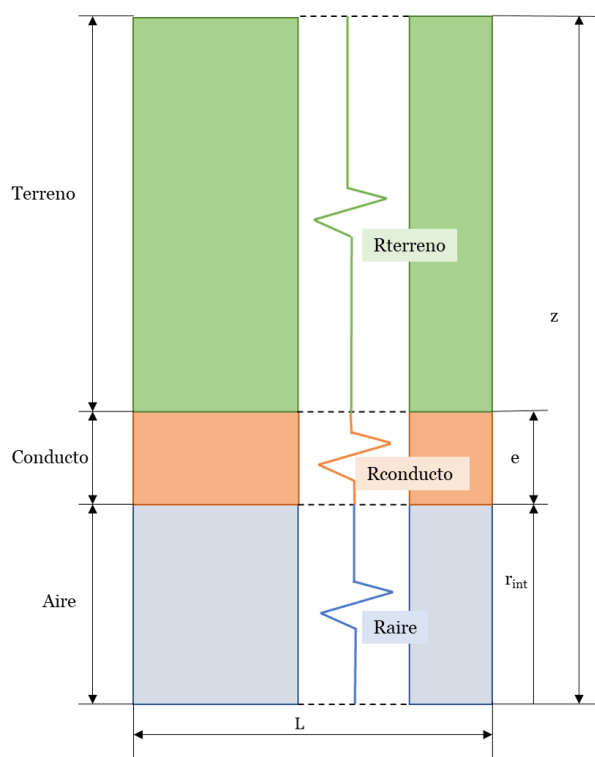


Figura 1 Esquema de resistencias térmicas de la instalación. Fuente: elaboración propia.

A lo largo de este anexo se va a explicar el procedimiento usado en el estudio de cada una de las resistencias térmicas, así como los rangos de valores calculados, los valores más habituales observados en la bibliografía y las conclusiones a las que se ha llegado.

Los principales objetivos de este análisis son los siguientes:

- Conocer los mecanismos de transferencia de calor de los diferentes medios implicados.
- Estudiar las diferentes resistencias y sus rangos de valores.
- Analizar la influencia de cada resistencia en la resistencia total.

Para ello se comenzó por estudiar los mecanismos de transferencia de calor y los diferentes tipos de resistencias presentes en el conjunto. A continuación, se calcularon los valores que pueden adoptar éstas dependiendo de los parámetros de diseño del intercambiador. Después, se calcularon las resistencias térmicas de cada una de las 31 instalaciones recopiladas mediante los datos disponibles. Con toda la información obtenida, se analizaron los valores de las tres resistencias más habituales que aparecían en la bibliografía.

Todas las resistencias térmicas se han calculado por unidad de longitud, salvo cuando se ha considerado la influencia de la longitud en ellas.

## Resistencia térmica del terreno

La resistencia térmica del terreno se ha calculado mediante análisis 2D con factor de forma, en este caso, como un cilindro horizontal isoterma de longitud  $L$  enterrado en un medio semiinfinito.

$$\text{Resistencia térmica del terreno [86]: } R_{t, \text{terreno}} = \frac{1}{F \cdot \lambda_{\text{terreno}}}$$

$$\text{Factor de forma [86]: } F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{4z}{D}\right)} \text{ o } F = \frac{2\pi L}{\text{arcosh}\left(\frac{2z}{D}\right)}$$

Siendo:

$F$  es el factor de forma [m]

$\lambda_{\text{terreno}}$  es la conductividad térmica del terreno [W/m·K]

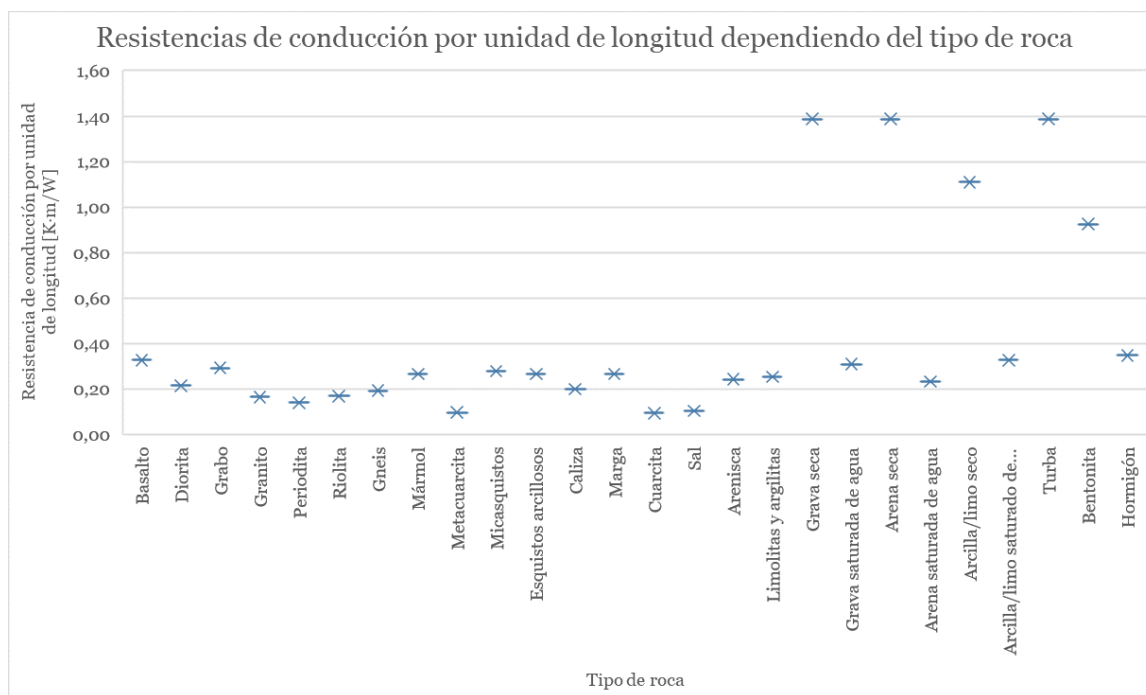
$L$  es la longitud del conducto [m]

$z$  es la profundidad de enterramiento del conducto [m]

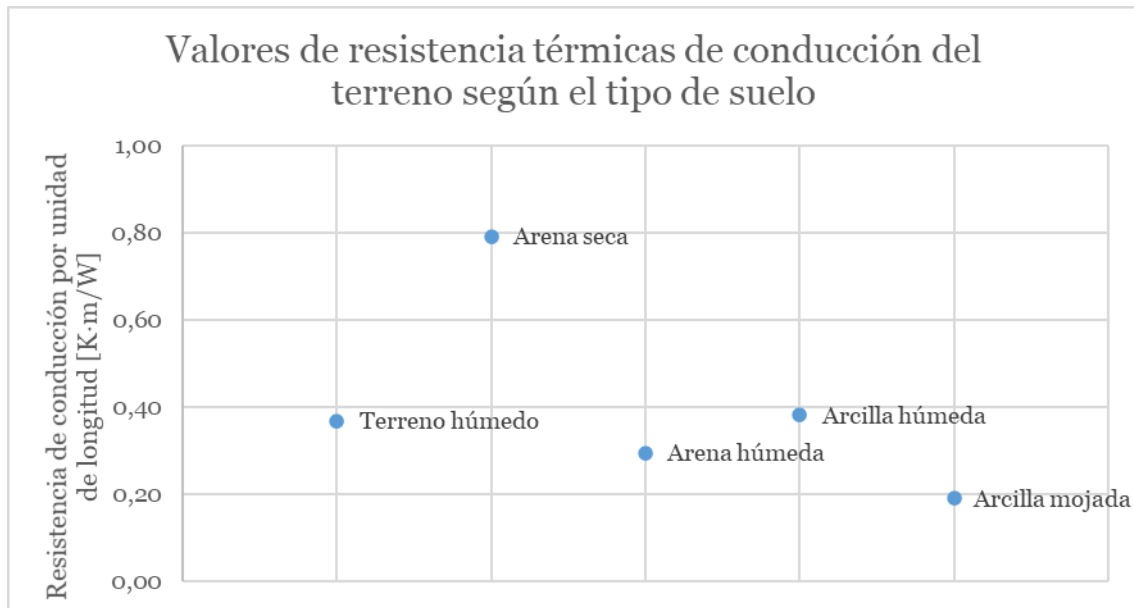
$D$  es el diámetro del conducto [m]

Para el cálculo se ha utilizado el primer factor de forma indicado, puesto que ambos tienen resultados similares.

Primero, se han calculados las resistencias dependiendo de los diferentes tipos de terreno y de roca presentes, los siguientes gráficos muestran los resultados obtenidos.

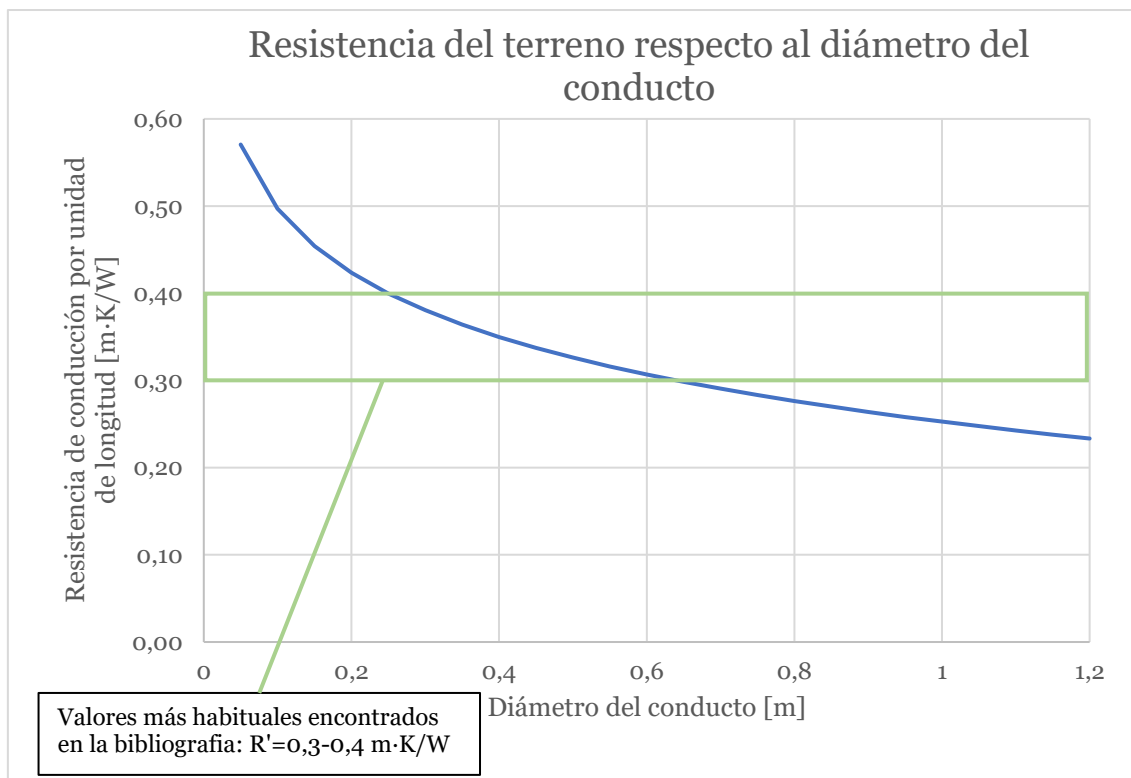


Gráfica 24 Resistencias de conducción por unidad de longitud dependiendo del tipo de roca. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía [87].

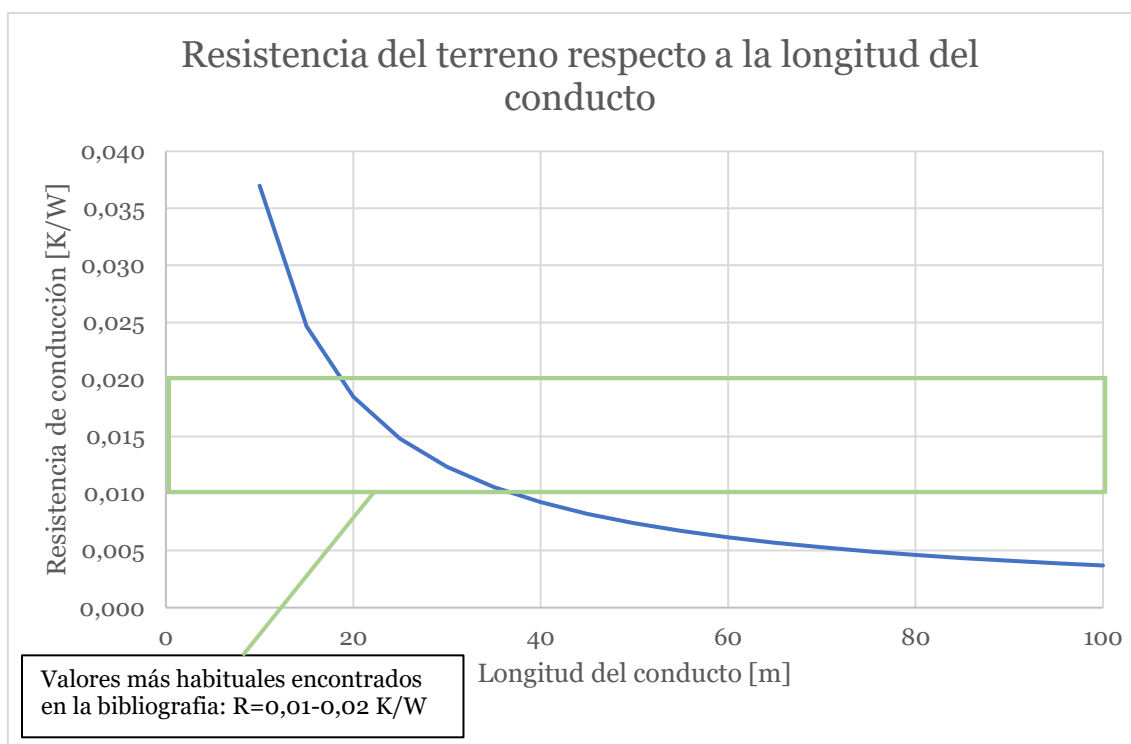


*Gráfica 25 Resistencia de conducción del terreno por unidad de longitud dependiendo del terreno.  
Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía [15].*

Como se puede ver en la gráfica anterior, cuanto mayor es el contenido de humedad del terreno, menor es el valor de la resistencia térmica, lo cual se corresponde con la bibliografía consultada. Se ha estudiado también la influencia que tienen los parámetros de los conductos en la resistencia, para ello se ha escogido el valor de conductividad del terreno húmedo,  $1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , [15] y para el cálculo del factor de forma, se han escogido los valores promedio de los parámetros que no están siendo analizados.



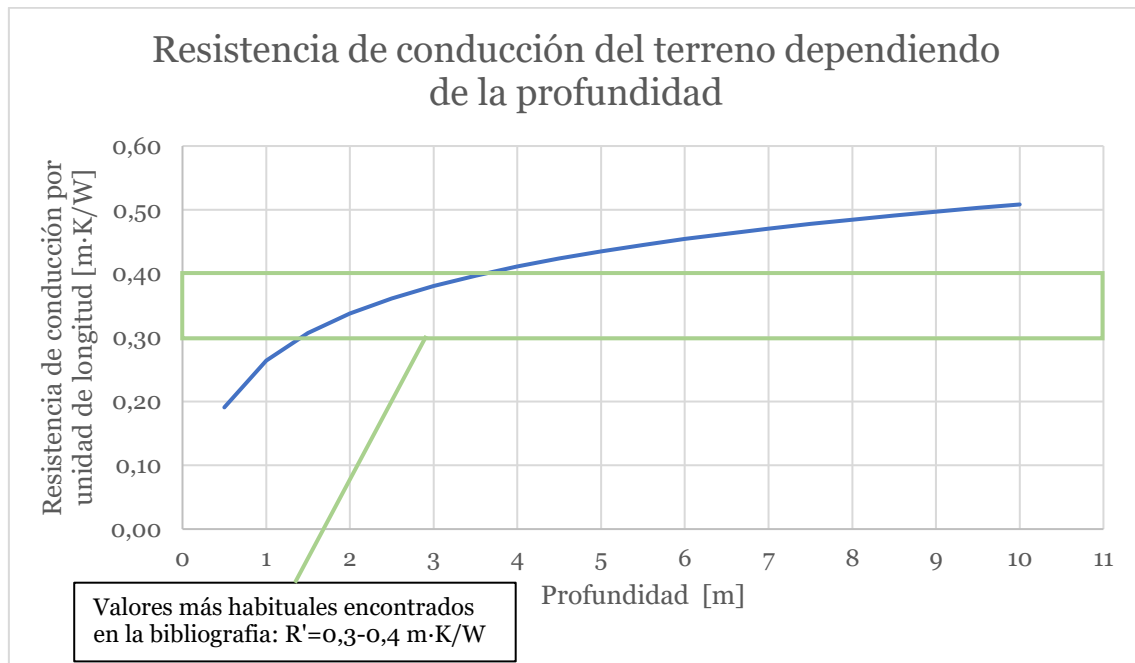
Gráfica 26 Resistencia del terreno dependiendo del diámetro del conducto. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 27 Resistencia del terreno dependiendo de la longitud del conducto. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las gráficas, a mayor diámetro y longitud de conducto, la resistencia de conducción disminuye. En concreto respecto a la longitud, teniendo en cuenta que las distancias recomendadas son entre 30 y 70 metros (dependiendo de las características de la ubicación y de las demandas de ventilación) y el orden de magnitud de variación de la

resistencia es de aproximadamente  $10^{-2}$  K/W. A su vez, el orden de magnitud de la resistencia dependiendo del diámetro es de  $10^{-2}$  K/W, por lo tanto, ambos parámetros tienen la misma influencia en el valor de la resistencia térmica del terreno.



*Gráfica 28 Resistencia del terreno dependiendo de la profundidad de enterramiento del conducto.  
Fuente: elaboración propia.*

Por otro lado, la profundidad no favorece la transferencia de calor puesto que aumenta proporcionalmente la resistencia térmica. Se deberá escoger una profundidad óptima en el que la temperatura del terreno sea adecuada para la obtención del salto térmico requerido y a su vez, minimice la resistencia del terreno.

Después de estudiar los diferentes parámetros que afecta al valor de la resistencia térmica del terreno, se observó que el rango de valores estaba entre  $4 \cdot 10^{-3}$  y  $1,4 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ , siendo los valores más habituales encontrados en la bibliografía entre 0,3 y 0,4  $\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$ .

## Resistencia de conducción del conducto

El conducto se ha analizado mediante un análisis unidimensional, cuya resistencia térmica es la siguiente:

$$R_{conducto} = \frac{1}{2\pi * \lambda_{conducto} * L} * \ln \frac{R_{int} + e}{R_{int}}$$

Siendo:

$\lambda_{conducto}$  es la conductividad térmica del conducto [W/K]

$L$  es la longitud del conducto [m]

$R_{int}$  es el radio interior del conducto [m]

$e$  es el espesor del conducto [m]

Se ha estudiado la influencia tanto de los distintos tipos de materiales como de los parámetros implicados.

Comenzando por la influencia de los materiales, en la siguiente tabla se pueden observar los valores de las conductividades térmicas de los materiales consideradas.

*Tabla 28 Conductividades térmicas de los distintos materiales de los conductos. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la bibliografía [86] [15].*

	Conductividad térmica [W/m·K]	Referencia
Acero inoxidable	14,4	[86]
Hormigón	1,25	[12]
Plástico (PE)	0,39	[86]
Aluminio puro	237	[86]

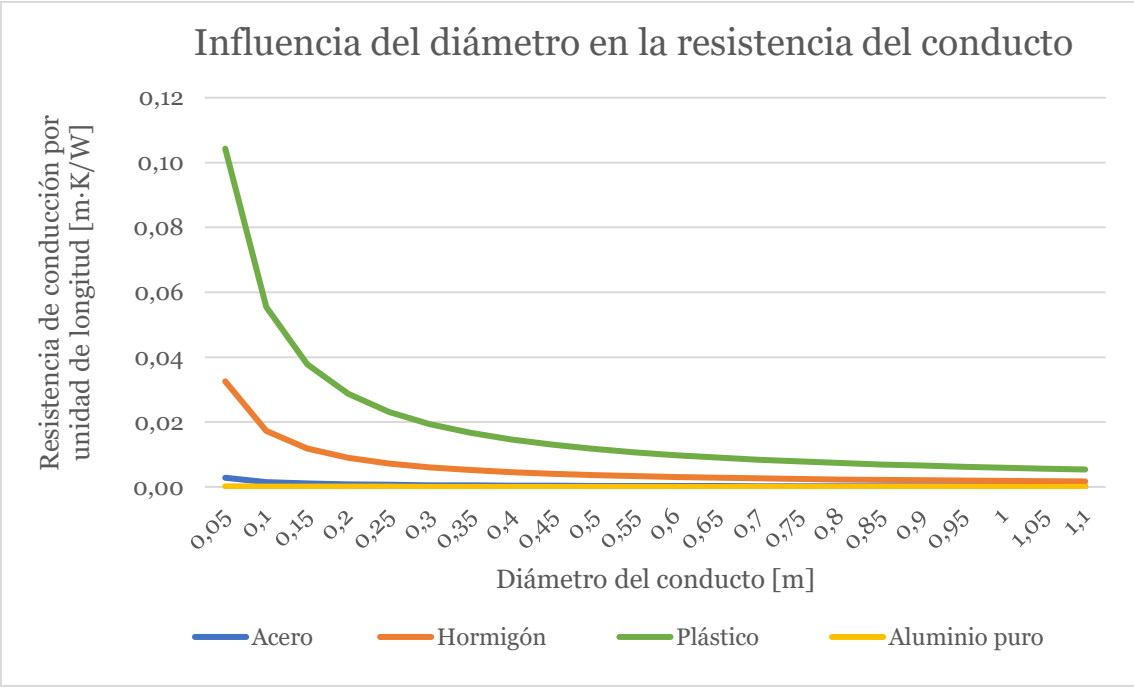
Para calcular los rangos de las resistencias dependiendo de los distintos materiales, se han considerado tanto las diferentes conductividades térmicas como los valores de los parámetros que maximizan y minimizan la resistencia, es decir, se han escogido los valores máximos y mínimos recopilados en las distintas instalaciones. Los resultados se pueden ver en la siguiente tabla:

*Tabla 29 Rangos de valores de las resistencias térmicas de distintos materiales. Fuente: elaboración propia.*

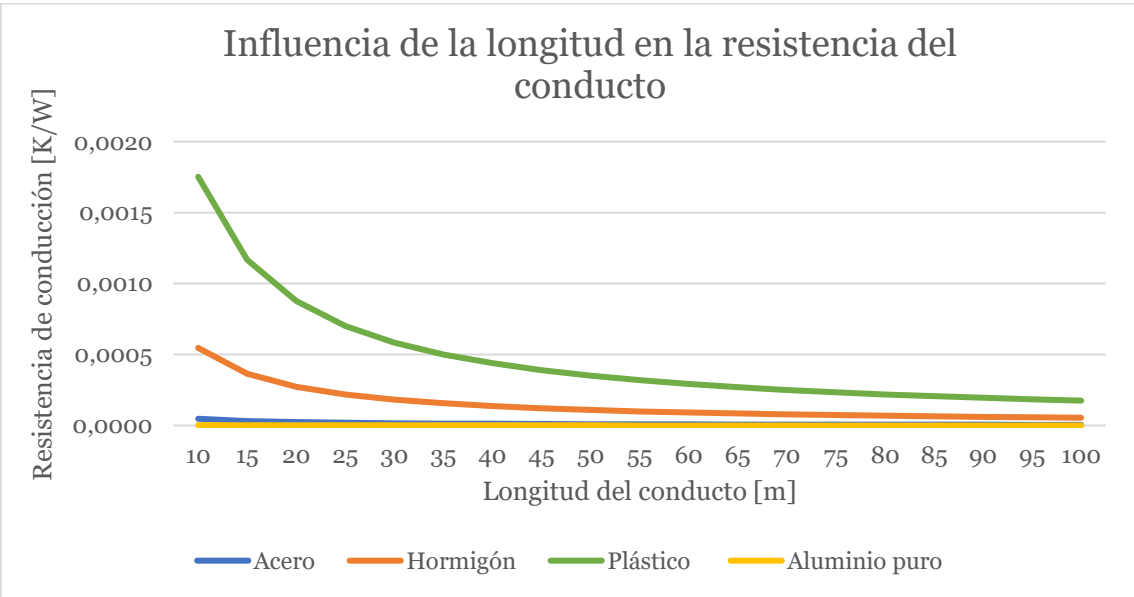
	Resistencia térmica de conducción del conducto por unidad de longitud [K·m/W]	
	Mínima	Máxima
Acero inoxidable	$4 \cdot 10^{-5}$	0,01
Hormigón	$4 \cdot 10^{-4}$	0,1
Plástico (PE)	$10^{-3}$	0,4
Aluminio puro	$2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-4}$

Debido a la falta de datos de las instalaciones estudiadas, sólo en cuatro de ellas se ha podido calcular el valor de la resistencia del conducto, siendo el orden de magnitud más habitual  $10^{-4}$  m·K/W.

Posteriormente, se ha realizado un análisis de la evolución de la resistencia de conducción dependiendo del valor de los parámetros dimensionales de la instalación. Se ha considerado el diámetro, el espesor y la longitud del conducto como se puede observar en las siguientes gráficas.

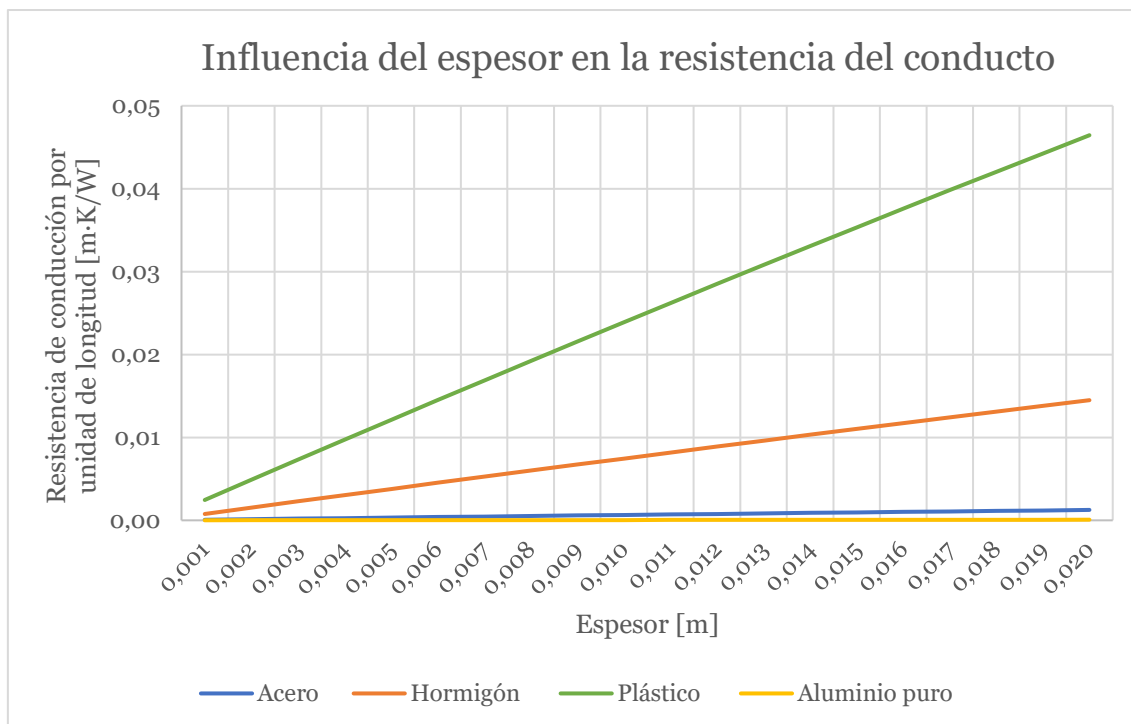


Gráfica 29 Influencia del diámetro en la resistencia del conducto. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 30 Influencia de la longitud en la resistencia del conducto. Fuente: elaboración propia.





Gráfica 31 Influencia del espesor en la resistencia del conducto. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, los valores de la resistencia térmica del conducto son muy pequeños, especialmente comparados con las otras dos resistencias. El plástico es el material que tiene un comportamiento peor a la transferencia de calor al tener un valor de conductividad térmica inferior al resto de materiales.

La longitud del conducto es el parámetro con una influencia menor en la resistencia, siendo su orden de magnitud entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ , y a partir de los 45 metros, se estabiliza. La elección del valor de diámetro y el espesor tiene una importancia mayor. La resistencia aumenta linealmente con el espesor, por lo tanto, lo ideal es que éste sea el mínimo posible. En cambio, a mayor diámetro, menor resistencia de conducción. A partir de 0,3 metros, el valor de la resistencia se estabiliza y es similar para todos los materiales considerados.

Teniendo en cuenta que los rangos recomendados para el diámetro son entre 0,2 y 0,6 metros y para la longitud, entre 30 y 70 metros, y considerando los valores de resistencia para los diferentes materiales, se ha concluido que la elección de material no tiene una importancia significativa.

Como se puede observar, en este apartado no se ha incluido un rango de valores habituales observados en la bibliografía, esto se debe a que sólo cuatro de las instalaciones contaban con los datos suficientes para calcular la resistencia. Se evidencia el hecho de que el conducto no supone una gran influencia en el resultado global y que, por lo tanto, los estudios se han centrado en el terreno y el aire a la hora de dimensionar las instalaciones.

## Resistencia de convección del aire

La resistencia de convección del aire es la más compleja de todas puesto que se trata de convección forzada interior. Se ha realizado mediante un análisis unidimensional radial cuya resistencia térmica es la siguiente:

$$R_{conv,aire-tubo} = \frac{1}{h_{aire} * A} = \frac{1}{h_{aire} * (2\pi * r * L)}$$

Siendo:

$h_{aire}$  es el coeficiente de convección del aire [W/m<sup>2</sup>]

$A$  es la superficie de intercambio de calor [m<sup>2</sup>]

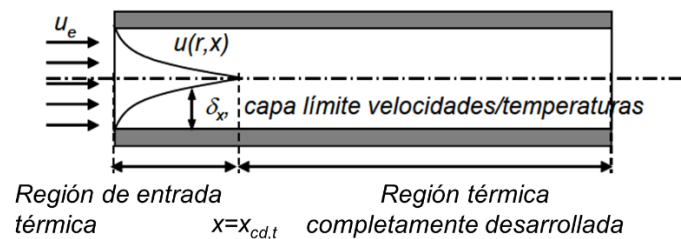
$r$  es el radio del conducto [m]

$L$  es la longitud del conducto [m]

Lo primero que se ha estudiado es el desarrollo de la capa límite térmica en un conducto circular, donde se diferencian dos zonas, la región térmica de entrada y la región completamente desarrollada. La longitud de entrada térmica  $x_{cd,t}$  marca el fin de región de entrada y el comienzo de la región completamente desarrollada y está definida dependiendo del tipo de flujo como [86]:

Flujo laminar:  $x_{cd,t} = 0,5 \cdot Re \cdot Pr \cdot D$

Flujo turbulento:  $x_{cd,t} \approx 10D$



Gráfica 32 Regiones térmicas del flujo convectivo en el interior de un conducto. Fuente: Incropera [24].

En el caso de los intercambiadores de calor tierra-aire, se ha calculado mediante la hipótesis de flujo turbulento ya que es el flujo que se encuentra en la mayoría de las instalaciones. La longitud de entrada térmica de las diferentes instalaciones recopiladas se encuentra entre el 5 y 20% de la longitud total del conducto y, por tanto, se ha considerado región completamente desarrollada la mayor parte del conducto, con el objetivo de simplificar los cálculos.

El siguiente paso es calcular el coeficiente de convección del aire, el cual depende del tipo de régimen del fluido en el interior del conducto, por ello, se ha analizado el número de Reynolds de las instalaciones recopiladas mediante su cálculo con la siguiente fórmula:

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Siendo:

$\rho$  es la densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  es la velocidad del aire en el interior del conducto [m/s]

$D$  es el diámetro del conducto [m]

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido [kg/s·m]

Los datos del aire se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 30 Datos de las características del aire. Fuente: Incropera [86].

Datos del aire [86]		
Densidad, $\rho$	1,184	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad dinámica, $\mu$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	kg/s·m
Conductividad térmica, $\lambda$	0,024	W/m·K

Se han usado dos procedimientos diferentes, para las instalaciones en las que se conoce el valor de la velocidad en el interior de los conductos, se ha calculado directamente el número de Reynolds con la fórmula descrita anteriormente. Para las instalaciones en las que no se conocía el valor de la velocidad, pero sí el valor del caudal nominal del ventilador de captación se ha aproximado el valor de la velocidad a partir del caudal y de los parámetros dimensionales mediante la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{n \cdot \pi R^2}$$

Donde:

$\dot{V}$  es el caudal nominal del ventilador [m<sup>3</sup>/s]

$A$  es el área de la sección del conducto [m<sup>2</sup>]

$n$  es el número de conductos de la instalación [-]

$R$  es el radio del conducto [m]

Se ha podido calcular el número de Reynolds de 13 de las instalaciones, de las cuales 11 presentaban flujo turbulento, una de ellas flujo laminar y otra régimen de transición. Por tanto, se concluye que el régimen predominante es el flujo turbulento.

A continuación, se ha realizado el cálculo del coeficiente de convección del aire:

$$h_{aire} = \frac{Nu \cdot \lambda_{aire}}{D}$$

Donde:

$Nu$  es el número de Nusselt [-]

$\lambda_{aire}$  es la conductividad térmica del aire [W/mK]

$D$  es el diámetro del conducto [m]

Para el cálculo del número de Nusselt se deben tener en cuenta los diferentes regímenes presentes y para ello, se han estudiado diferentes correlaciones, las cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 31 Correlaciones para el cálculo del número de Nusselt en flujo interno. Fuente: elaboración propia.

Correlaciones		Número de Nusselt	Condiciones
Régimen laminar, RCD	$q''=\text{cte}$ [86]	$Nu = 4,36$	Completamente desarrollado $Pr \geq 0,6$
	$T_s=\text{cte}$ [86]	$Nu = 3,66$	Completamente desarrollado $Pr \geq 0,6$
Régimen de transición	Gnielinski [88]	$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$ <p>Factor de fricción [89]:</p> $f = (0,709 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}$ <p>para <math>3.000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6</math></p>	$0,7 \leq Pr \leq 2000$ $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ $L/D \geq 10$
Régimen plenamente turbulento	Colburn [90]	$Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^{1/3}$	Propiedades del fluido evaluadas a $T_m$ .
	Dittus-Boelter [91]	$Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^n$	Turbulento, completamente desarrollado $0,7 \leq Pr \leq 160$ $ReD \geq 10.000$ $L/D \geq 10$ con $n=0,4$ para calentamiento y $n=0,3$ para enfriamiento. Propiedades del fluido evaluadas a $T_m$ . Solo para diferencias de $(T_s - T_m)$ moderadas:
	Sieder-Tate [92]	$Nu = 0,027 Re^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	Turbulento, completamente desarrollado $0,7 \leq Pr \leq 16.700$ $ReD \geq 10.000$ $L/D \geq 10$ Propiedades del fluido evaluadas a $T_m$ excepto $\mu_s$ a $T_s$ .
	Whitaker [93]	$Nu$ $= 0,015 Re^{0,83} Pr^{0,42} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	Flujo turbulento.
	Petukhov [89]	$Nu = \frac{(f/8)Re \cdot Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	$0,7 \leq Pr \leq 2000$ $10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$

		Factor de fricción [89]: $f = (0,709 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}$ para $3.000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$	$L/D \geq 10$ El cálculo es preciso hasta $\pm 10\%$ .
--	--	---	---

A continuación, se van a explicar los resultados obtenidos para los diferentes tipos de flujo.

#### *Flujo laminar*

Es importante indicar que la instalación a la que corresponde este flujo se trata de la ventilación de una sala y no un edificio, por ello, a pesar de haber sido evaluada, este régimen no es representativo de la tendencia. En el análisis se ha considerado que la temperatura de la superficie del conducto es constante ( $T_s = \text{cte}$ ) debido a que se acepta la hipótesis de que el terreno actúa como foco y la transferencia de calor no afecta al conducto. Para esta correlación se considera que  $Nu = 3,66$  y el valor de la resistencia térmica del aire por unidad de longitud es  $3,62 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ .

#### *Régimen de transición*

Para las instalaciones que presentan régimen de transición, se ha escogido la correlación de Gnielinski, cuyos parámetros están recogidos en la tabla 30. Este régimen está presente en dos instalaciones, cuyas resistencias térmicas por unidad de longitud son  $0,15 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$  y  $0,77 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ .

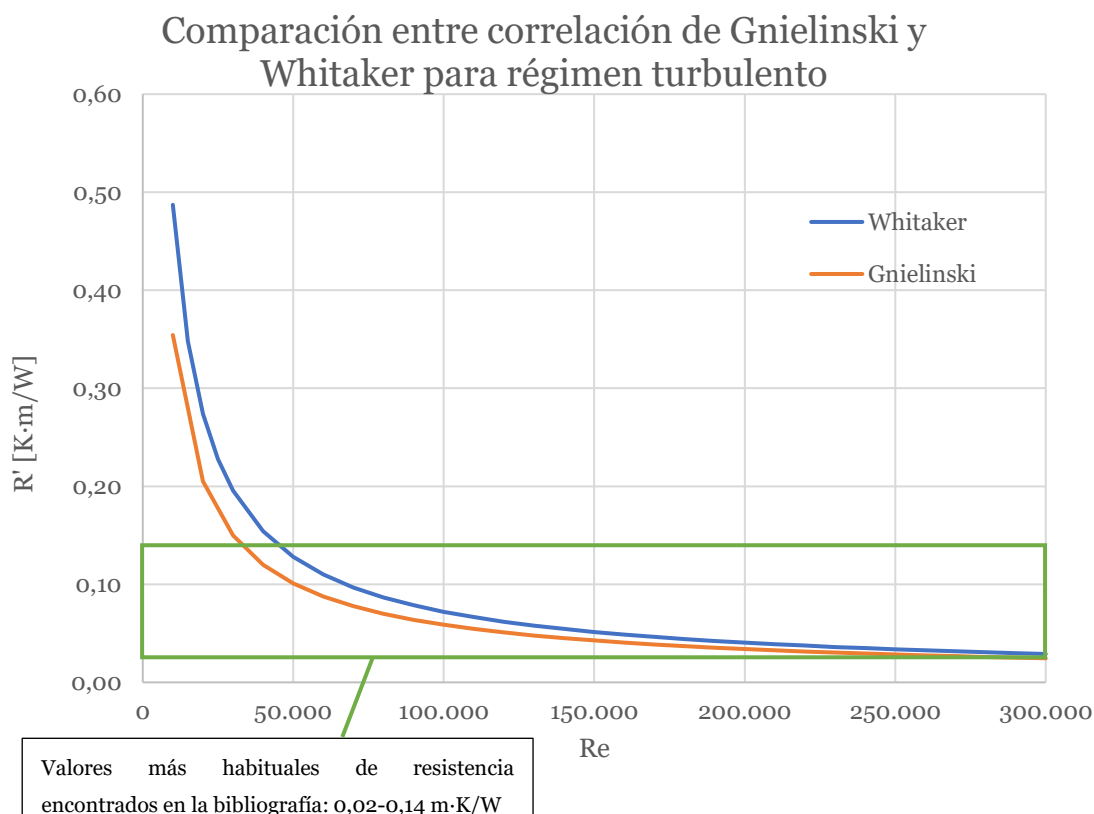
#### *Régimen turbulento*

Para el flujo turbulento, que es el predominante en las instalaciones, se han estudiado las distintas correlaciones explicadas en la tabla 30 cuyos resultados están plasmados en la siguiente tabla.

*Tabla 32 Resultados de las resistencias térmicas dependiendo de distintas correlaciones para el flujo turbulento. Fuente: elaboración propia.*

Correlación		Resistencia de convección [K/W]	
		Re promedio	Re máximo
Colburn		0,0019	0,00011
Dittus-Boelter	Enfriamiento	0,0019	0,00011
	Calentamiento	0,0020	0,00011
Sieder-Tate		0,0017	0,00009
Whitaker		0,0022	0,0016
Petukhov		0,0016	0,00009

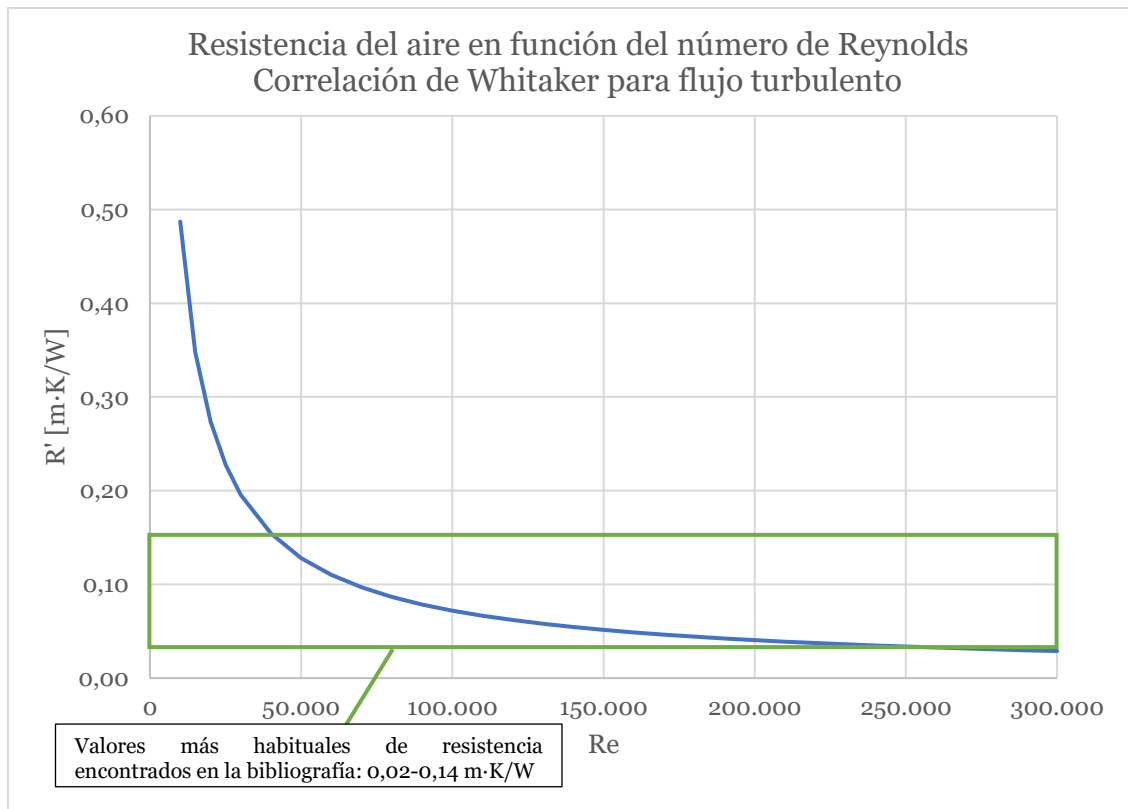
Adicionalmente, se ha comparado la correlación de Whitaker, que es apropiada para valores de  $Re$  propios del flujo turbulento, y la correlación de Gnielinski, que se puede usar tanto régimen de transición y turbulento. Se ha realizado este análisis con el objetivo de estudiar si es apropiado usar la correlación de Whitaker en los casos de flujo de transición y simplificar los cálculos en el software de prediseño.



Como se puede ver, para los valores habituales encontrados en la bibliografía, ambas correlaciones tienen resultados muy similares. Por ello, de aquí en adelante, se ha utilizado la correlación de Whitaker para el cálculo del número de Nusselt.

El último paso de este estudio ha consistido en analizar la influencia de distintos parámetros en el resultado de las resistencias térmica de convección del aire.

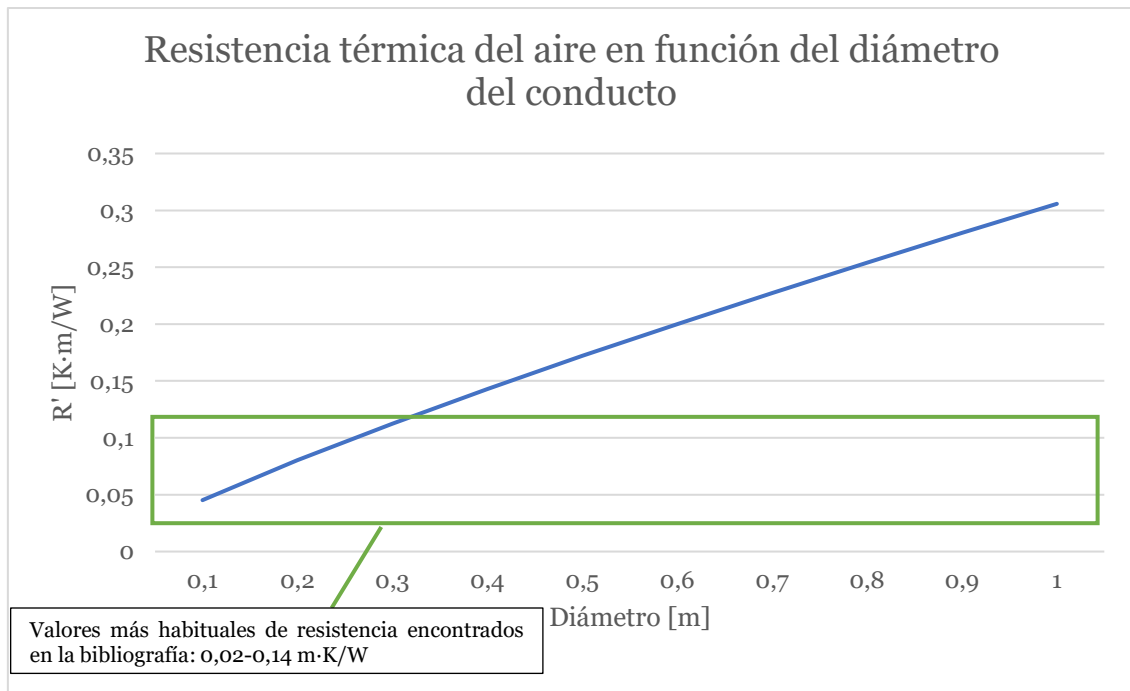
En la siguiente gráfica se puede observar la evolución del valor de la resistencia respecto al número de Reynolds, se puede comprobar que, a mayor  $Re$ , como era de esperar, la resistencia disminuye. Por ello, es ideal que la velocidad del aire en el interior de los conductos sea elevada.



*Gráfica 33 Evolución de la resistencia de convección del aire respecto del número de Reynolds. Fuente: elaboración propia.*

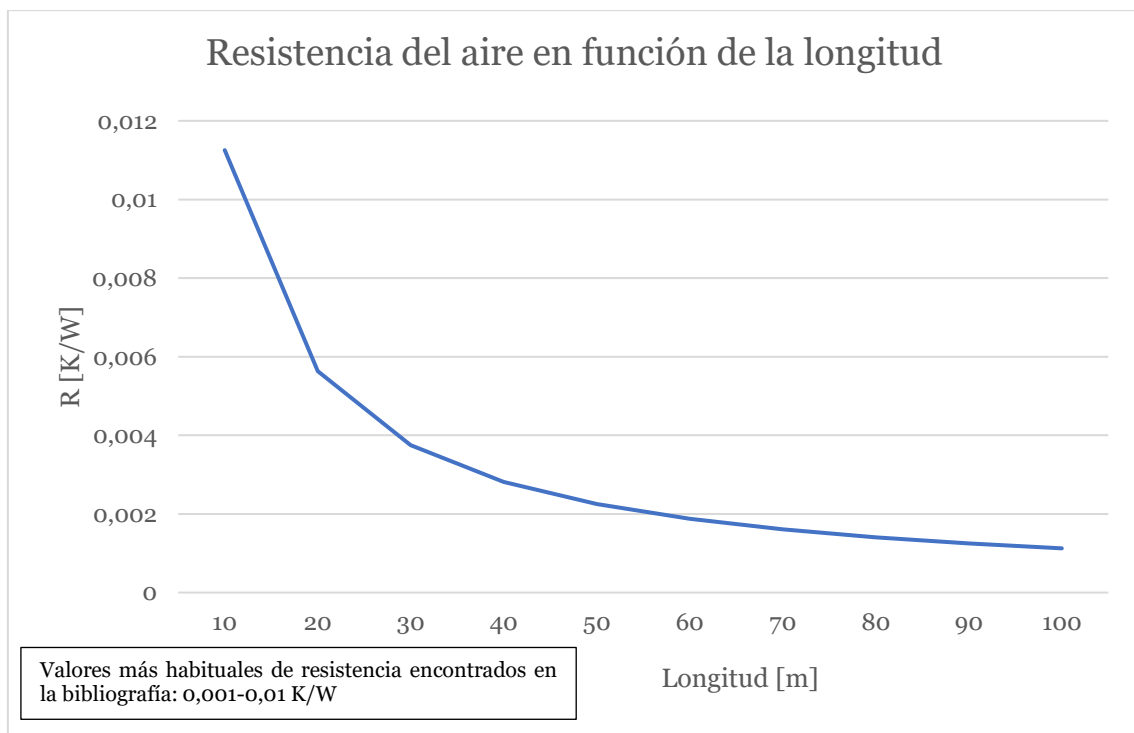
A continuación, se han estudiado los parámetros dimensionales que afectan a la resistencia térmica del aire que, en este caso, son el diámetro y la longitud.

Para el análisis de la influencia del diámetro se ha variado el diámetro para un mismo caudal de aire. Como se puede comprobar en la siguiente gráfica, a mayor diámetro, mayor resistencia del aire, esto es debido a que, al aumentar la sección del conducto, la velocidad del aire en el interior disminuye, haciéndose el número de Reynolds más pequeño y obteniéndose una peor transferencia de calor.



Gráfica 34 Resistencia térmica del aire en función del diámetro del conducto. Fuente: elaboración propia.

En el caso de la longitud, a mayor valor, menor valor de la resistencia debido a que ésta es inversamente proporcional a este parámetro.



Gráfica 35 Resistencia térmica del aire en función del diámetro del conducto. Fuente: elaboración propia.



## Resultado del cálculo de las resistencias térmicas de las instalaciones recopiladas

La siguiente tabla contiene los valores de las resistencias calculadas de las 31 instalaciones de la bibliografía junto con los datos dimensionales.

Tabla 33 Resultado del cálculo de las resistencias térmicas de la bibliografía. Fuente: elaboración propia.

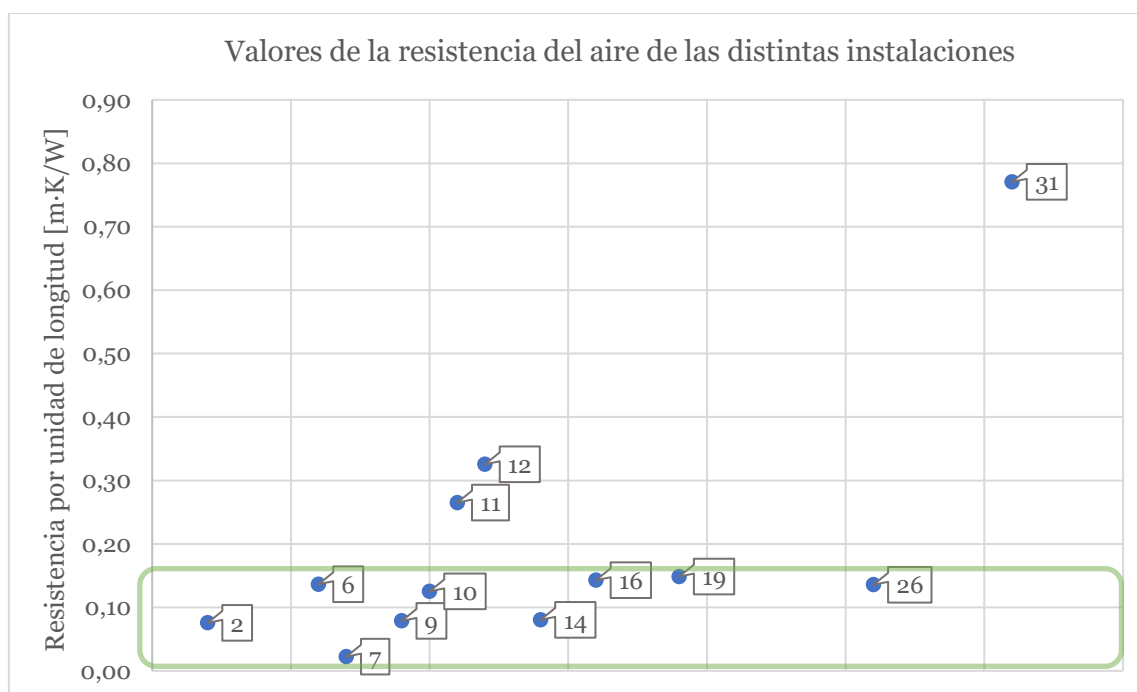
Instalación	Diámetro interior [m]	Espesor [m]	Número de conductos	Longitud [m]	Profundidad de enterramiento [m]	Material	R'terreno [m · K/W]	R'conducto [m · K/W]	R'aire [m · K/W]	R'total [m · K/W]
<b>1</b>	0,31			16	2,5		0,4			
<b>2</b>	0,15		1	21,5	0,4	Aluminio	0,3		0,08	
<b>3</b>	0,215	0,002	1	15		Acero inoxidable (16,2 W/mK)		0,0001		
<b>4</b>	0,1016		1	6	2,5		0,5			
<b>5</b>	0,31			16	2,5		0,4			
<b>6</b>	0,17	0,015	1		0,83		0,3		0,14	
<b>7</b>	1,2			28	6		0,3		0,02	
<b>8</b>	0,219		1	15,5		Acero inoxidable				
<b>9</b>	0,5		9	40	2,5		0,3		0,08	
<b>10</b>	0,25		30	42	1,5		0,3		0,13	
<b>11</b>	0,25		16	30	1,5		0,3		0,27	
<b>12</b>	0,2		20	35	1,5		0,4		0,33	
<b>13</b>	0,2		11		2		0,4		3,6	
<b>14</b>	0,7		4	70					0,08	
<b>15</b>	0,4		6	50	3		0,4			
<b>16</b>	1,2		14	120	55		0,3		0,14	
<b>17</b>	0,2		20	18	1,5		0,4			
<b>18</b>	0,2		20	15	2		0,4			
<b>19</b>	0,2		8	23	2		0,4			

<b>20</b>	0,1		26	12	0,45		0,3		0,15	
<b>21</b>	0,019		12	1,2	1		0,6			
<b>22</b>				30	3					
<b>23</b>			2	50						
<b>24</b>			2	25						
<b>25</b>				40	4	PVC				
<b>26</b>	0,3	0,05	18	50	4	Hormigón	0,4	0,02	0,14	0,74
<b>27</b>			52	16,7	2,72	Polietileno de alta densidad				
<b>28</b>	0,5		8	30	2		0,3			
<b>29</b>			45	35						
<b>30</b>	0,25	0,0088	8	52		Polipropileno		0,0141		
<b>31</b>	0,15	0,0056	21	8	2	Hierro galvanizado	0,4	0,0001	0,77	1,19

A continuación, se ha ilustrado el valor de la resistencia del aire y del terreno de las instalaciones en las que se ha podido calcular al disponer de los datos necesarios. Se ha omitido el estudio de las resistencias térmicas del conducto al no disponer de datos para ello.

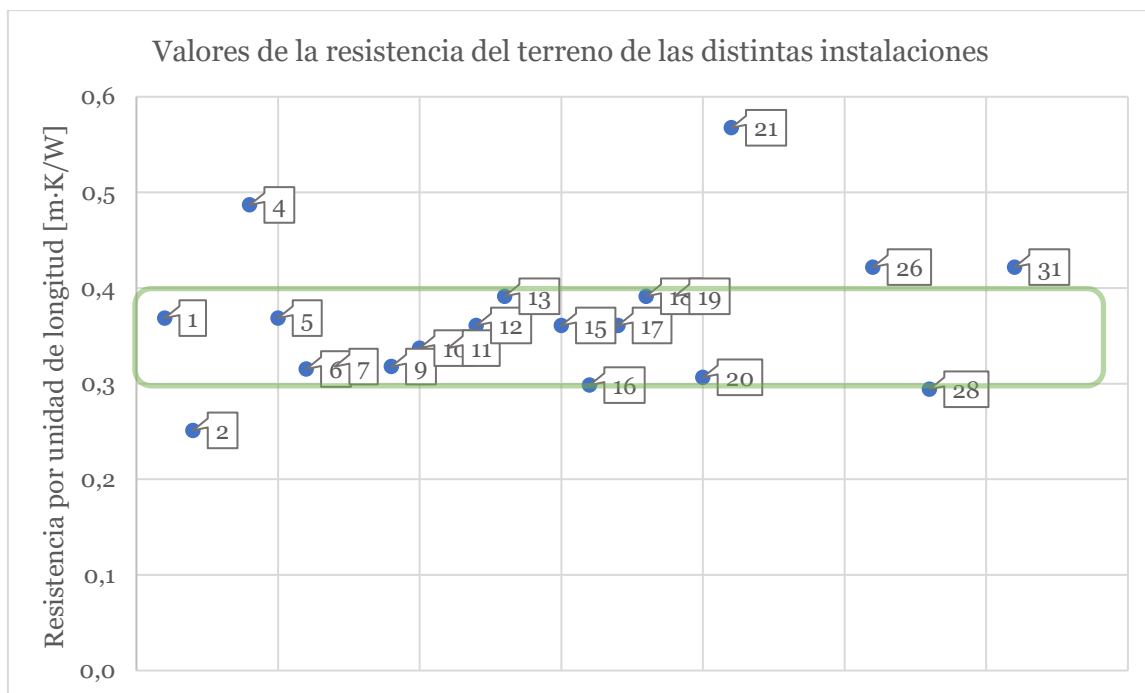
El número asociado a cada valor es el número de la instalación a la cual corresponde de la tabla 21, tener en cuenta que esta numeración no corresponde con la numeración asociada a las instalaciones ilustradas en el apartado ‘Recopilación de los datos de las instalaciones estudiadas’ puesto que no todas las instalaciones recogidas en la bibliografía se han considerado para el análisis de las resistencias.

El rango de valores habitual de la resistencia del aire es entre 0,02 y 0,14 m·K/W. En el caso de la resistencia correspondiente a la instalación que presenta flujo laminar (instalación 13,  $R'_{\text{aire}}=3,6 \text{ m·K/W}$ ) se ha omitido su valor con el propósito de la gráfica quedara más clara.



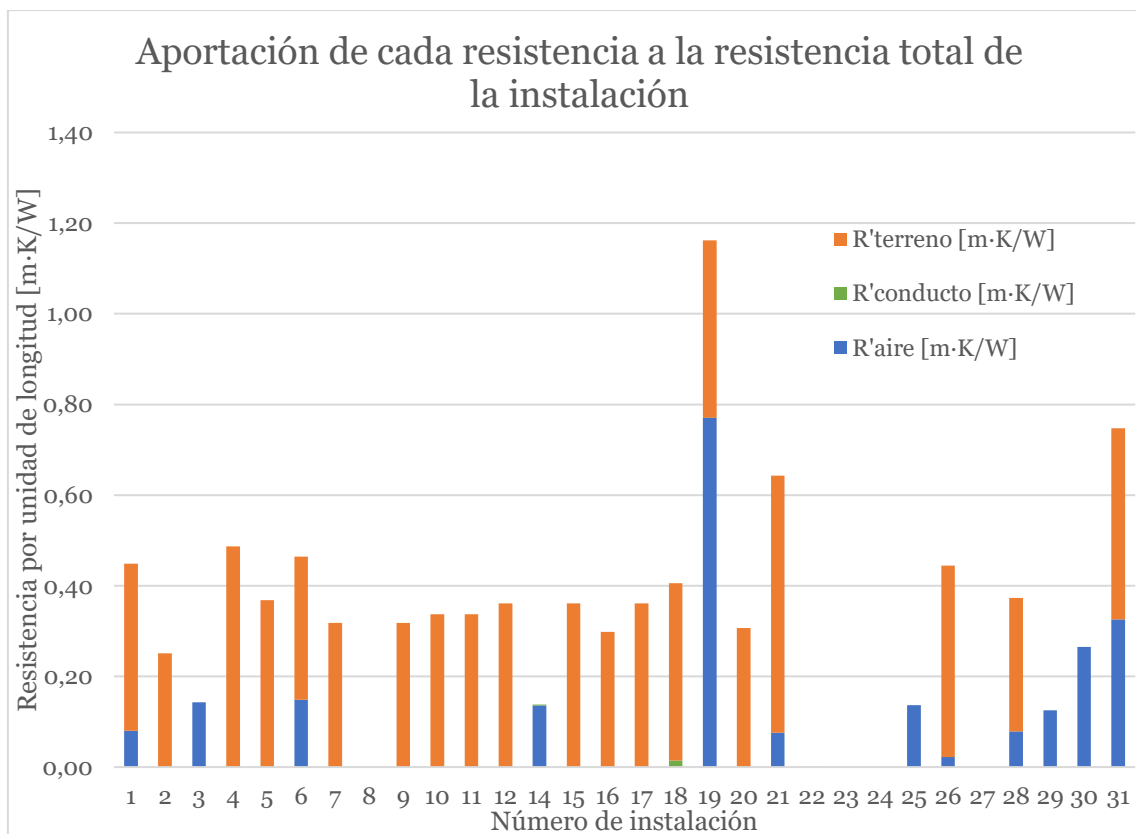
Gráfica 36 Valores de la resistencia térmica del aire de las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia.

En el caso de la resistencia del terreno, los valores habituales varían entre 0,3 y 0,4 m·K/W, en la gráfica se puede observar que los valores de esta resistencia son similares, esto se debe a que, al no disponer de datos sobre el terreno, se ha asumido en la mayoría de las instalaciones el mismo valor de conductividad térmica del terreno.



Gráfica 37 Valores de la resistencia térmica del terreno de las instalaciones de la bibliografía. Fuente: elaboración propia.

Por último, se ilustra la aportación de cada resistencia a total de la instalación. En este caso también se ha omitido el valor de la resistencia de la instalación 13 para que la gráfica sea más clara e ilustrativa.



Gráfica 38 Aportación de cada resistencia térmica a la resistencia global de la instalación. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, la resistencia térmica predominante en el 85% de las instalaciones estudiadas es la del terreno, esto se debe a que se ha escogido el flujo de aire más adecuado para que minimice el efecto en el conjunto de las resistencias y la resistencia térmica global sea lo más pequeña posible. Además, de la resistencia del conducto no se tiene un número de resultados similar al de las resistencias del aire y del terreno, esto es debido que la bibliografía no da una gran importancia a esta resistencia lo cual confirma que ésta no se considera influyente en el resultado final ni el comportamiento del intercambiador.

## Influencia de las distintas resistencias en el resultado global

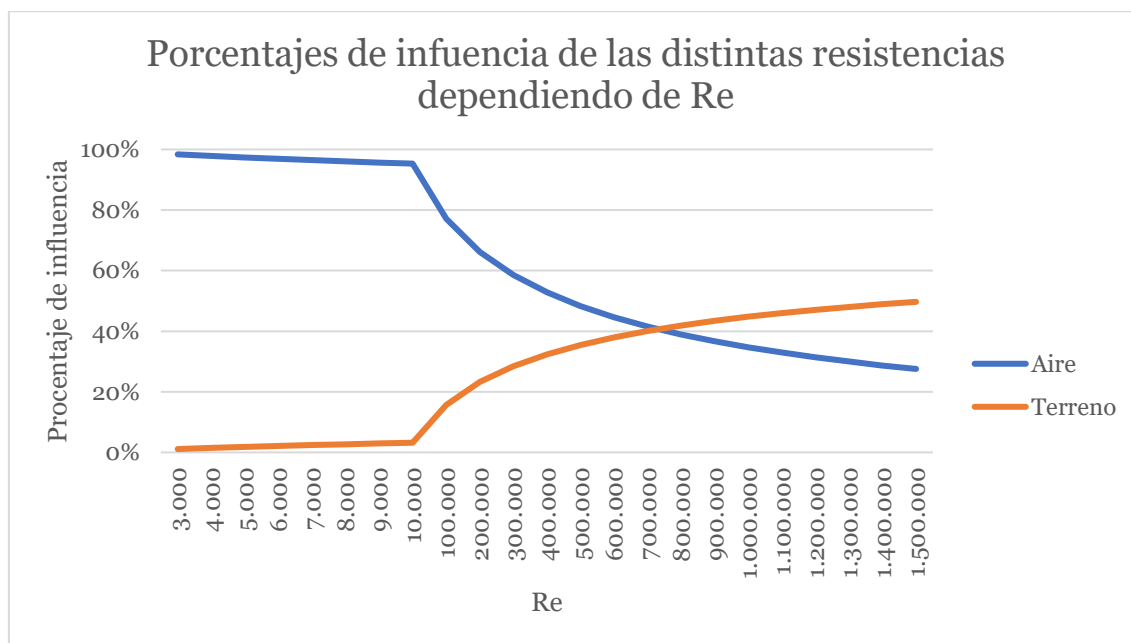
Como paso final, se ha analizado la influencia de las tres resistencias y su peso en la resistencia total. En la siguiente tabla, se puede observar los porcentajes de las resistencias considerando las resistencias máximas y mínimas calculadas a lo largo del análisis, así como las calculadas a partir de los datos más habituales encontrados en la bibliografía:

Tabla 34 Porcentajes de las distintas resistencias. Fuente: elaboración propia.

Porcentaje de cada resistencia		
	Valores habituales	Rango
Conducto	0,40%	---
Terreno	72,7%	35,4 – 93,4 %
Aire	27,3%	6,6 – 64,6 %

Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- Se confirma que la influencia del conducto es mínima y que las resistencias dominantes son las del terreno y del aire.
- La influencia de estas dos últimas depende fuertemente del tipo de flujo presente en la instalación, como ilustra la gráfica a continuación. En el régimen de transición, el aire es la resistencia predominante, en cambio, en el régimen turbulento, conforme aumenta la velocidad en la instalación, la influencia del terreno se hace mayor.



Gráfica 39 Porcentajes de influencia de las distintas resistencias dependiendo de Re. Fuente: elaboración propia.

En el caso de las instalaciones estudiadas, la resistencia térmica del terreno es la predominante en todas salvo una de ellas, esto se debe a que el flujo de aire es régimen turbulento y en el caso restante, la instalación presenta régimen transitorio, el cual tiene asociado una peor transferencia del calor y, por lo tanto, una resistencia térmica mayor. Se puede ver reflejado en la gráfica 32 del anterior apartado.

## Incertidumbres asociadas a las resistencias térmicas

El último paso en el análisis de principales incertidumbres asociadas a las tres resistencias térmicas se detalla a continuación.

### *Resistencia de conducción del terreno*

La principal problemática es la debida a una mala caracterización del terreno. Algunas de estas incertidumbres se detallan a continuación.

- Mala calibración del medidor del coeficiente de conducción del terreno o mala estimación.
- Error asociado al ensayo: equipo, personal, variabilidad en la repetición de ensayos.
- Variabilidad de las características del terreno dependiendo de la geografía, la profundidad, la humedad (debido a las precipitaciones y el nivel freático) y la vegetación.
- Discontinuidades en la compactación del terreno, especialmente, en el área próxima al conducto.

Esta resistencia constituye la principal incertidumbre del conjunto al ser el terreno un elemento sobre el que la influencia externa es limitada al no poder cambiar la totalidad de las propiedades térmicas.

### *Resistencia de convección del aire*

Las incertidumbres asociadas a esta resistencia son las siguientes:

- Mala estimación de las magnitudes que participan en el cálculo del número de Reynolds, lo que puede conducir a un error en la identificación del tipo de régimen presente en los conductos.
- Error asociado a la medición del caudal, debido a que es muy difícil medir de manera precisa este parámetro. Su medición se puede hacer mediante las curvas de presión del ventilador elegido para la instalación o la realización de un balance de energía en una resistencia eléctrica introducida en el interior del conducto.
- Error asociado a la velocidad en el conducto puesto que su medición precisa es difícil en conductos. Es posible determinarla mediante la ecuación de continuidad.
- Correlación incorrecta para el cálculo del número de Nusselt.

### *Resistencia de conducción del conducto*

Las incertidumbres asociadas al conducto son geométricas:

- Variación del espesor a lo largo del conducto.
- Composición del material variable.
- Características reales del material diferentes de las especificadas.



